



Fonderia

Ottenimento di un componente nella sua forma 'finale'
attraverso la colata di metallo liquido in un 'adeguato' contenitore

- lingotti
- colata continua
- in forma
 - transitoria
 - permanente



Attitudine dei materiali alla fabbricazione per fusione

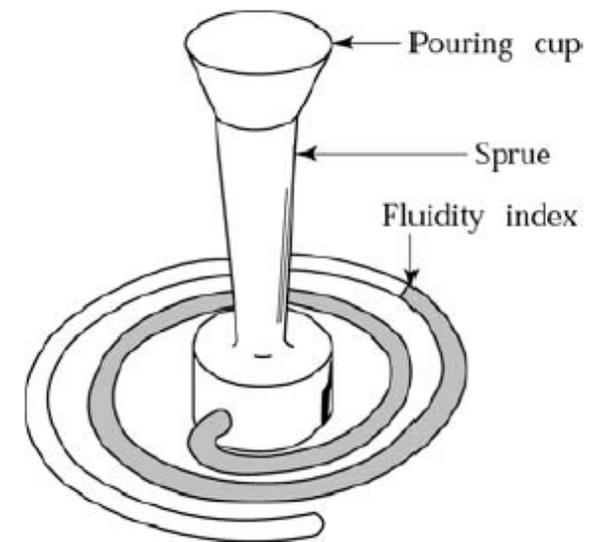
Fusibilità

- fondere a temperature relativamente basse (MAX 1500-1600 °C)
- mantenere una sufficiente omogeneità
- fornire getti esenti da difetti

Influenza la tecnologia scelta, i parametri, il materiale e le caratteristiche della forma, la velocità di colata, etc

Colabilità

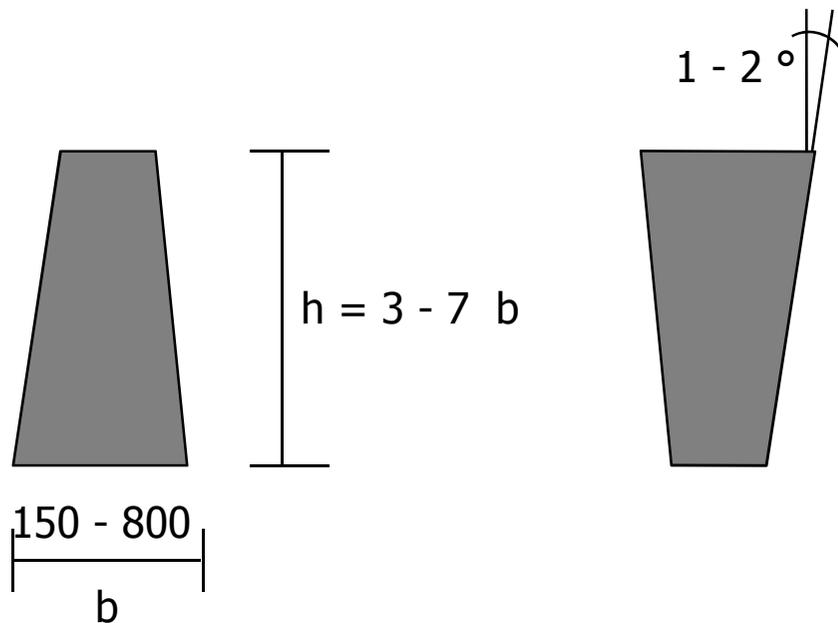
riempire completamente la forma (fluidità / colabilità / scorrevolezza)





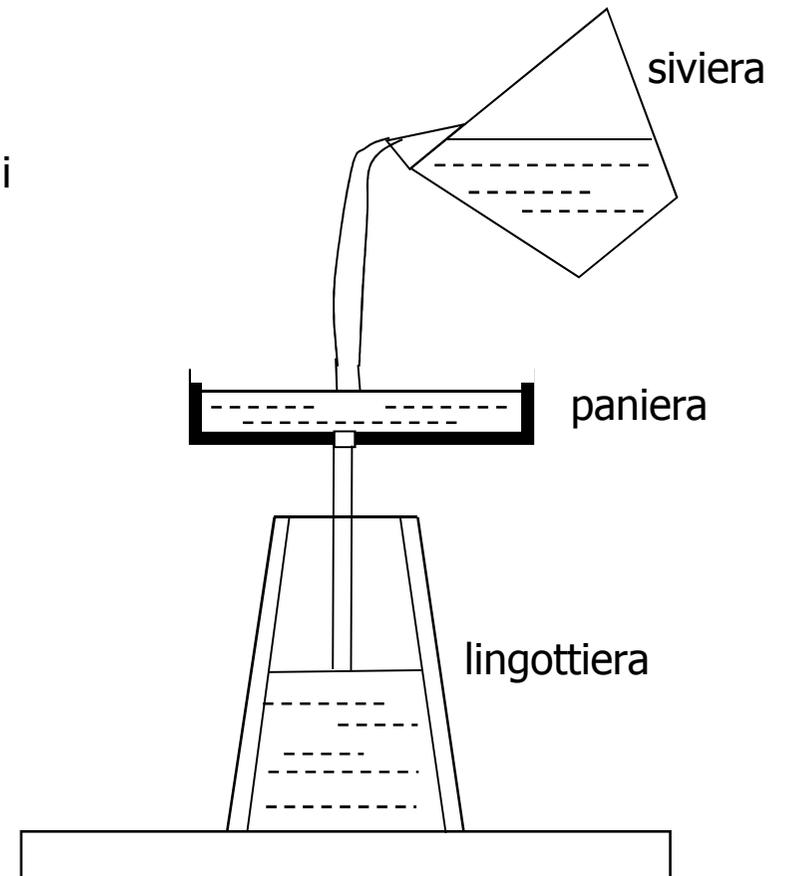
Lingotti

blocchi di metallo destinati a successive lavorazioni



conicità diretta

conicità inversa

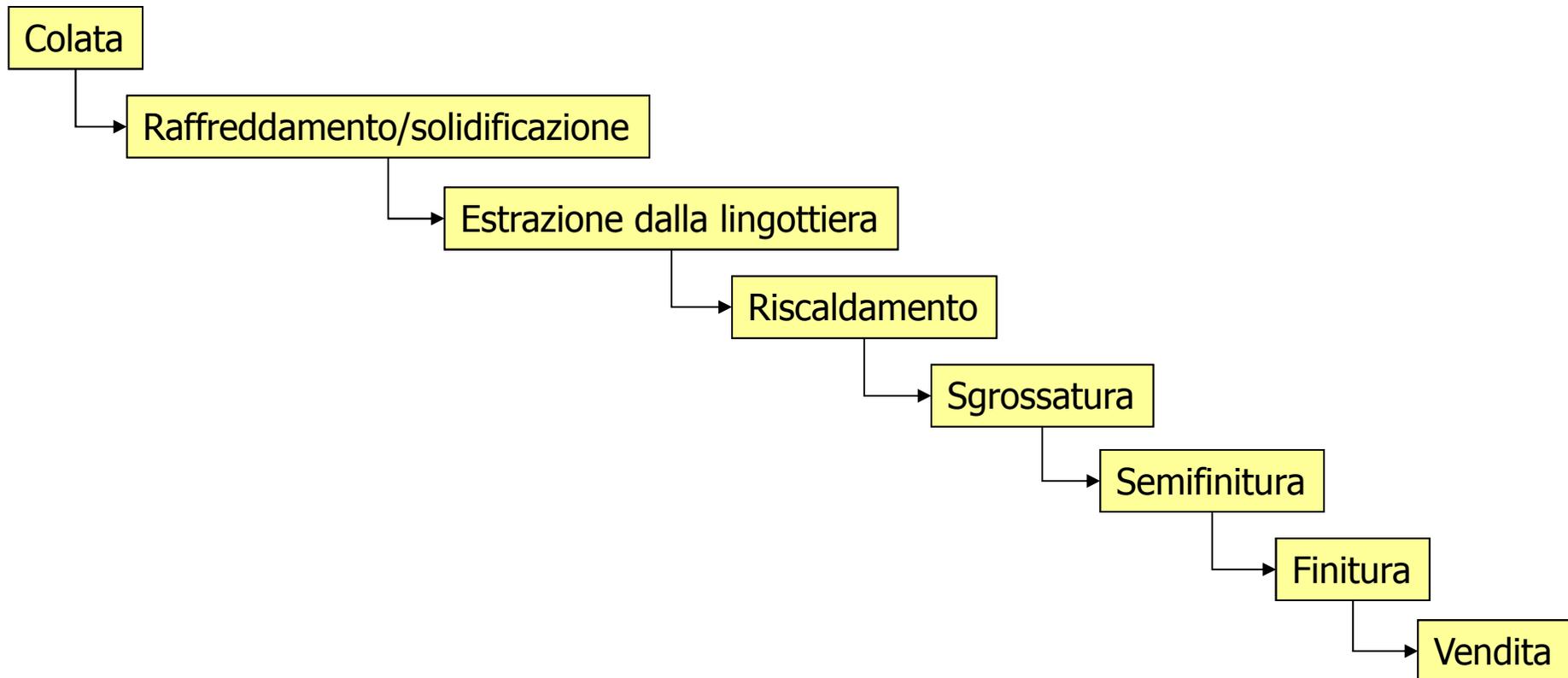


sistema di colata

- diretto
- in sorgente
- con bacino intermedio



La "vita" di un lingotto



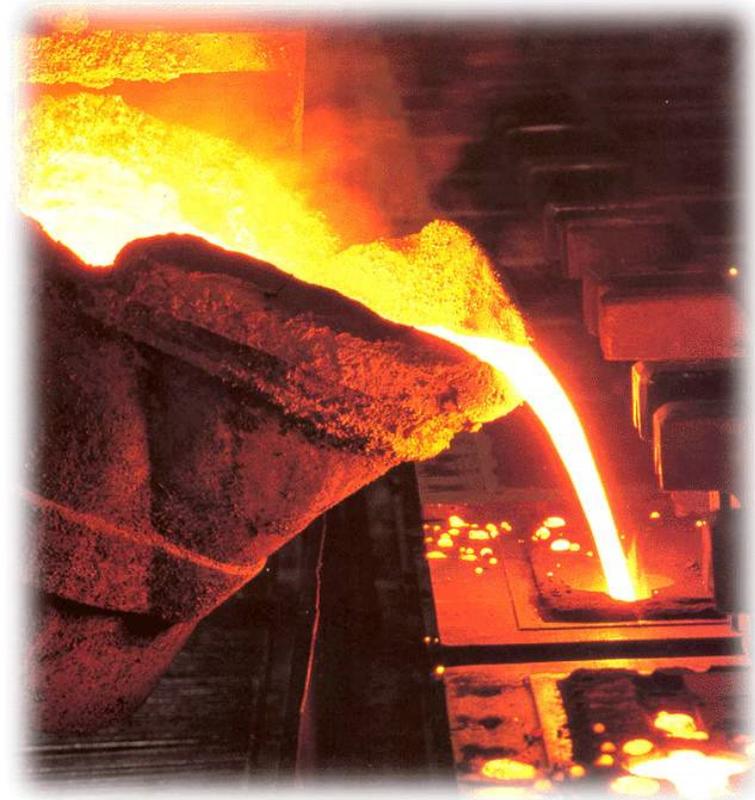


Siviera





scorificazione



colata



Fonderia

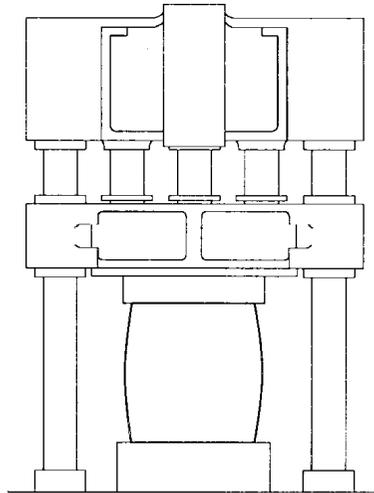


Riscaldamento



Forno a spinta

Sgrossatura

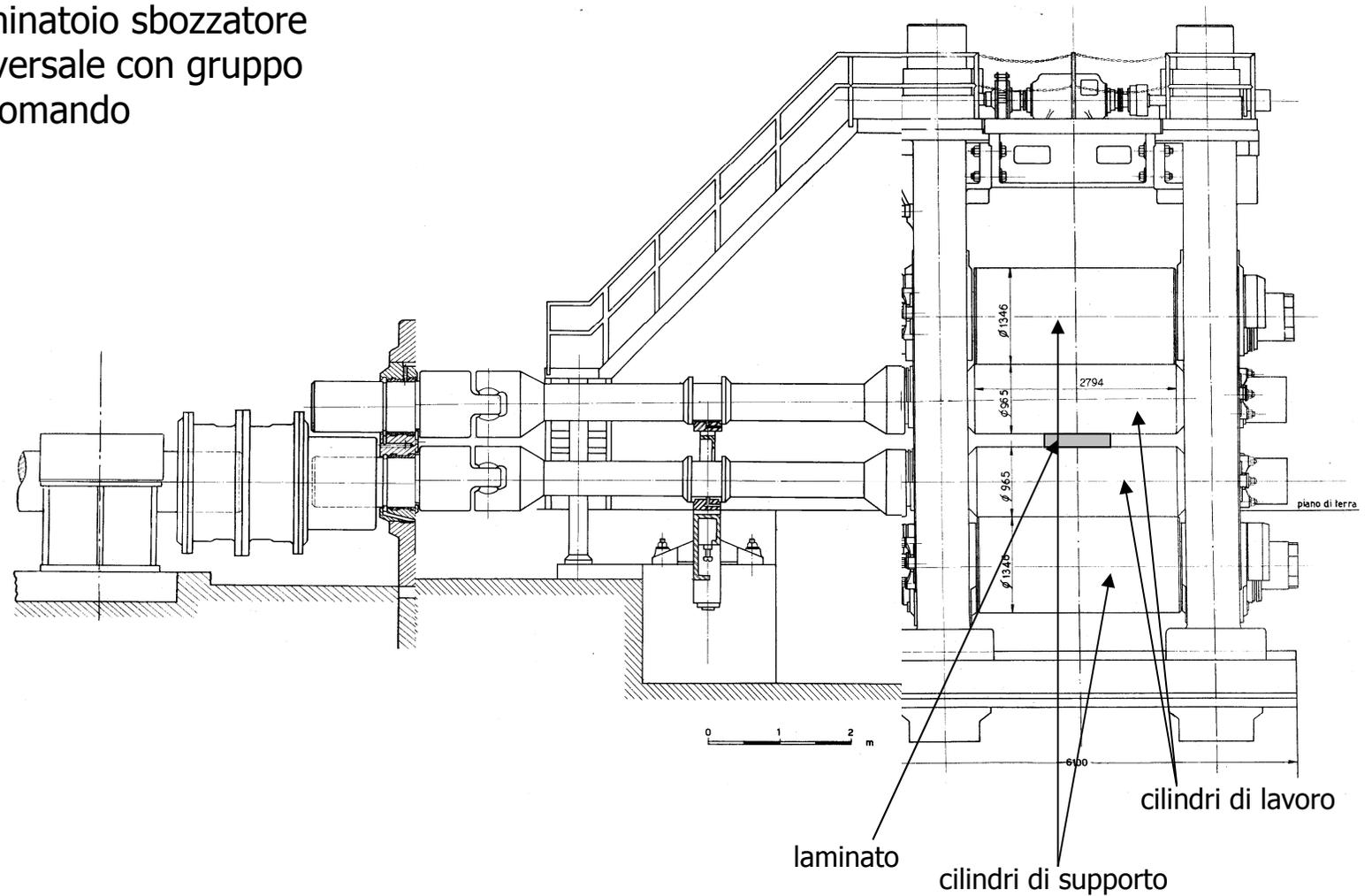


Pressa
idraulica

Fonderia



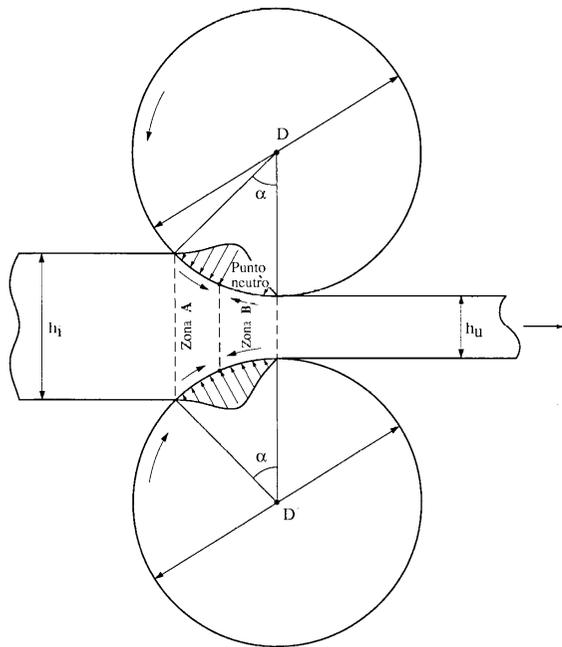
Laminatoio sbozzatore
universale con gruppo
di comando





Semifinitura

Laminatoio a caldo



Laminazione



Finitura

Laminazione a freddo

tolleranze (ritiro, deformazioni)
finiture (picchi e valli)
qualità del prodotto (ossidazione)

Asportazione di truciolo

tolleranze
finiture
versatilità

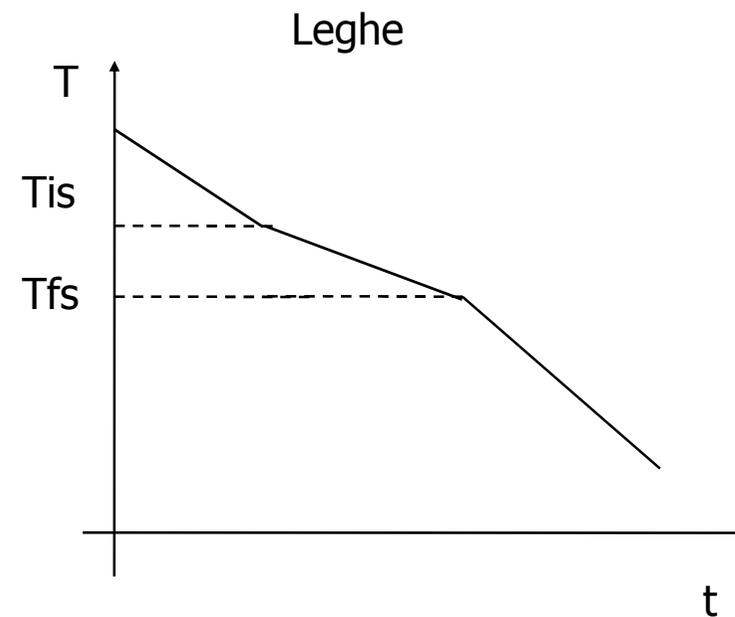
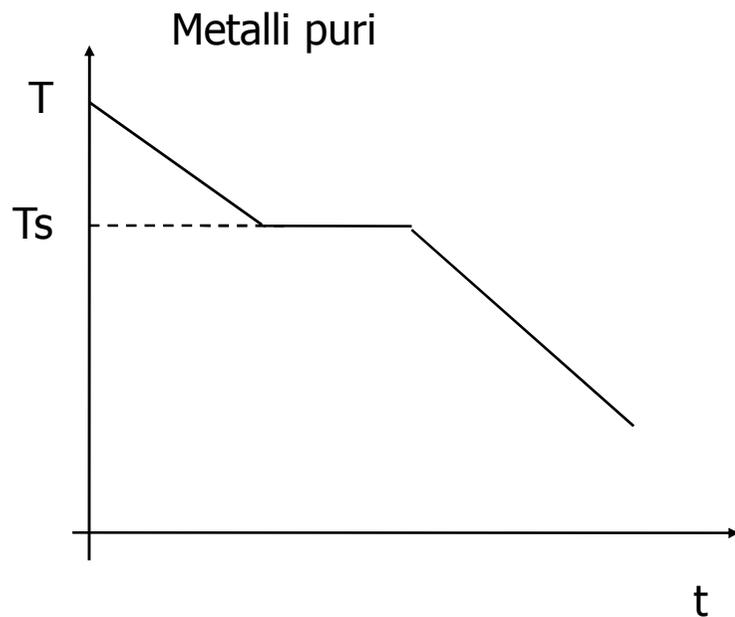
Saldatura

tubi
aghi



Solidificazione

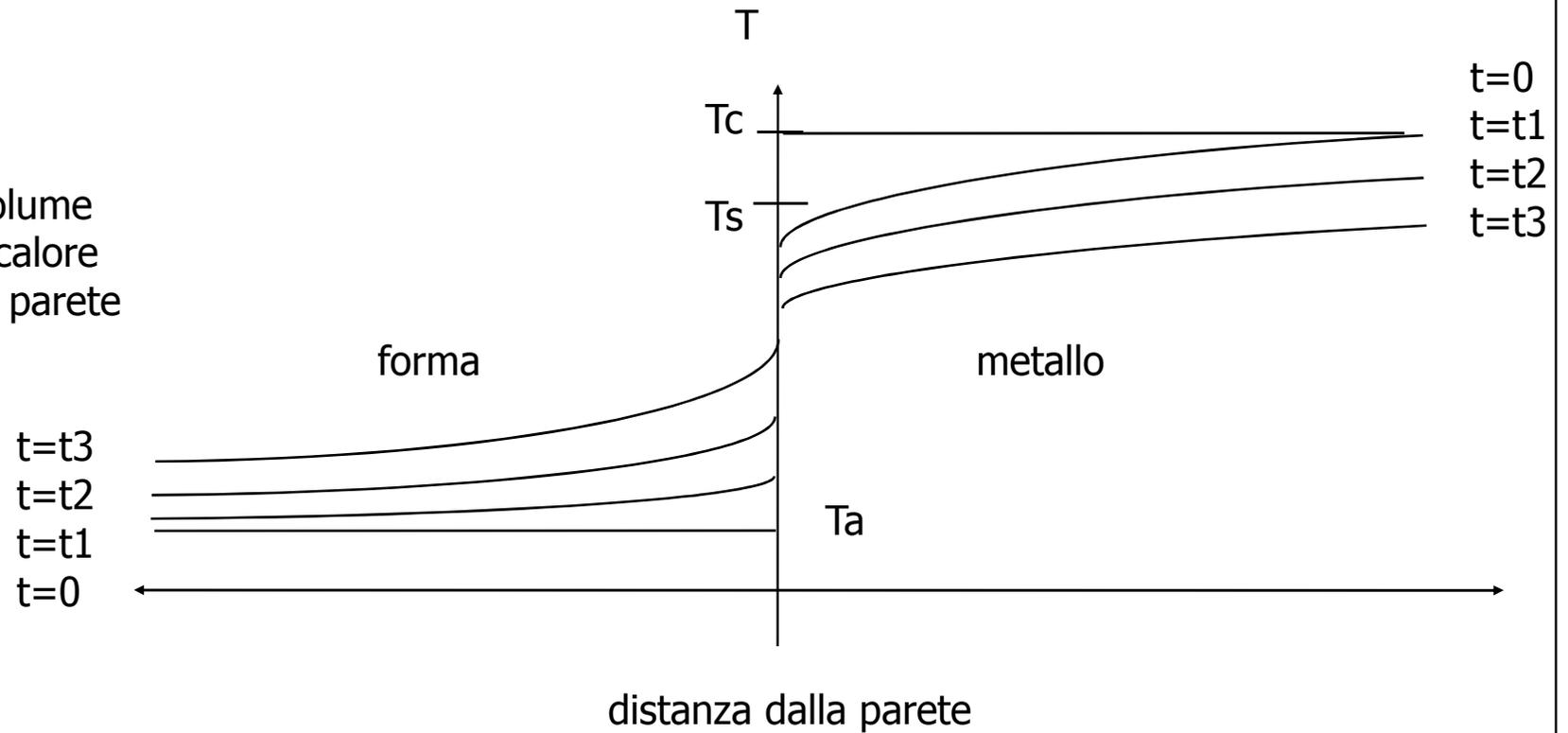
caso ideale (termodinamica e cinetica)





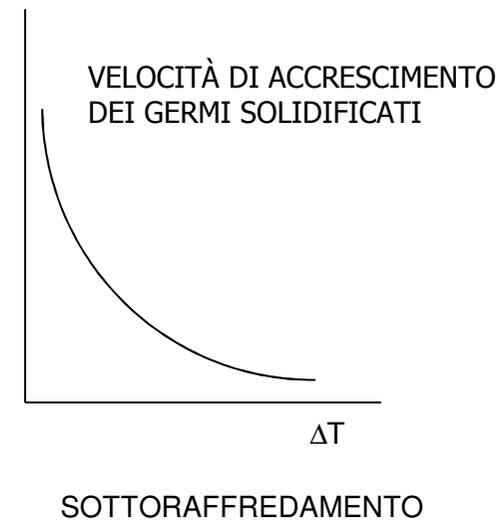
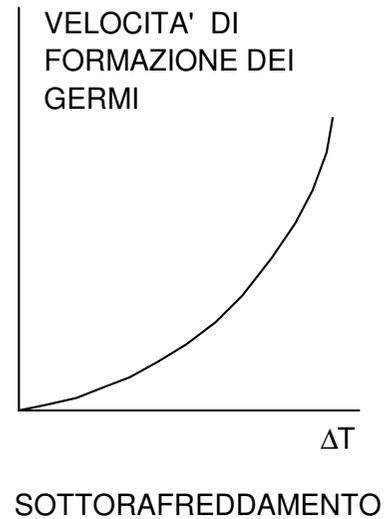
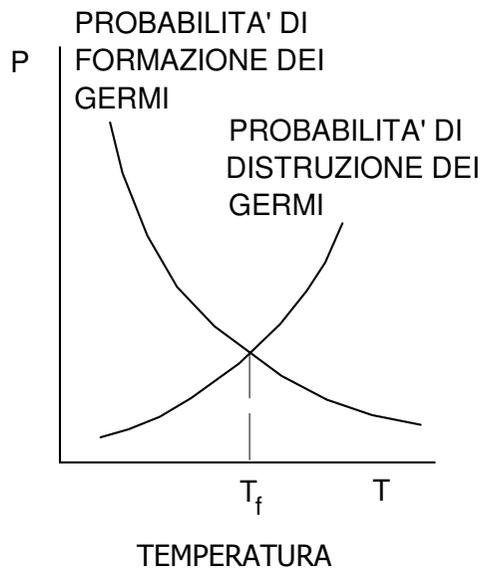
caso reale

- nucleazione
- accrescimento
- scambi termici
- variazioni di volume
- sottrazione di calore attraverso una parete





Nucleazione ed accrescimento

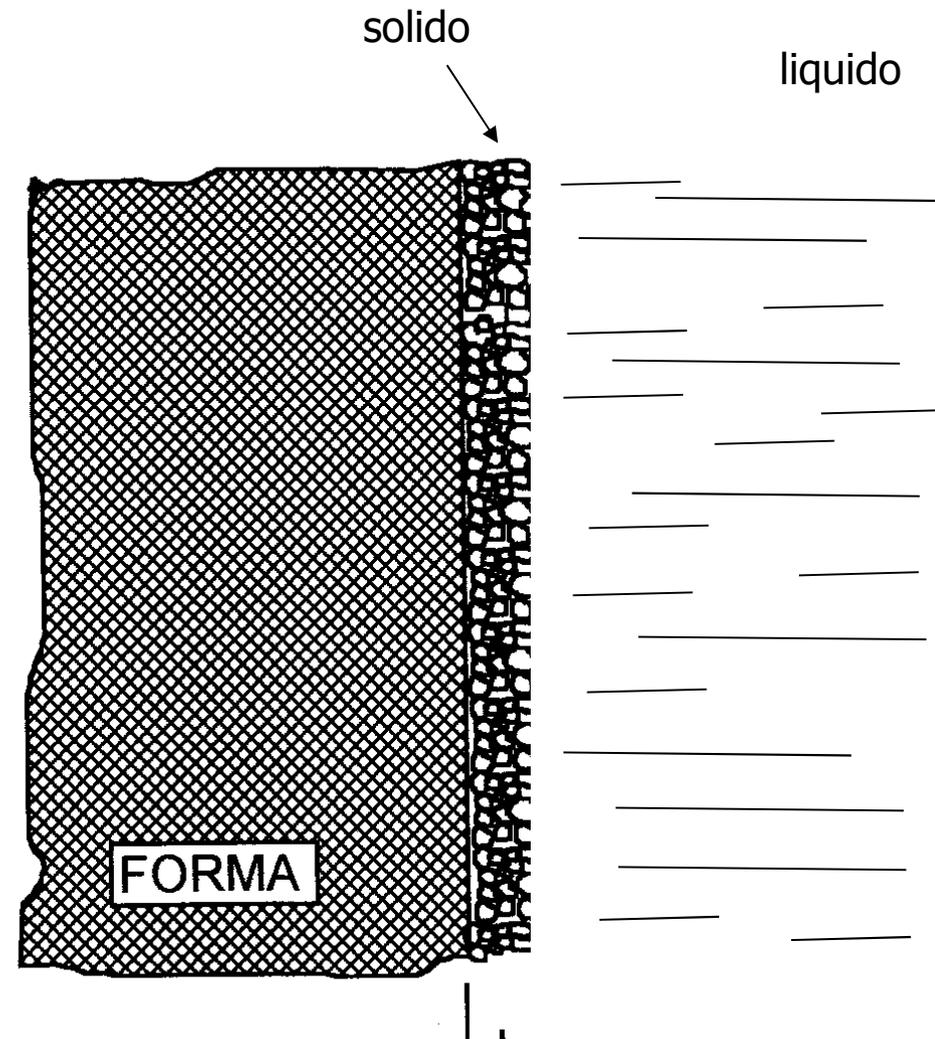




$t = t_1$

alta differenza di temperatura
--> grosso sottoraffreddamento
--> molti grani piccoli

----> buone caratteristiche meccaniche
crosta dura che può dare problemi nelle
lavorazioni meccaniche successive



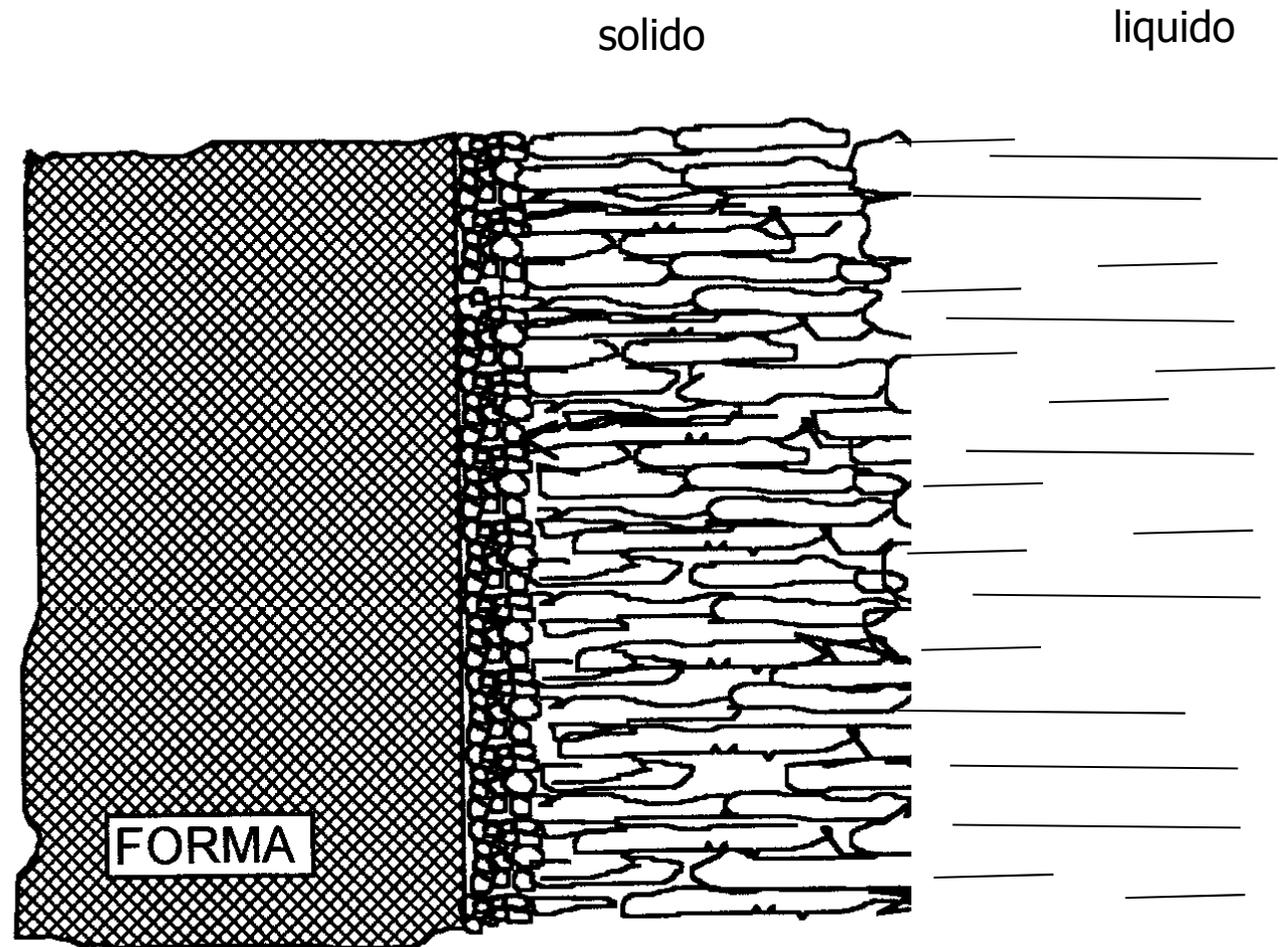


$t = t_2$

la solidificazione interessa
una zona maggiore del getto
e quindi aumenta il valore (assoluto)
della contrazione di volume

- > distacco di getto dalla forma
- > strato di aria interposto
(bassa conducibilità)
- > velocità di raffreddamento piccola
con direzione preferenziale di
sottrazione del calore

- > grani allungati, anisotropia,
segregazione

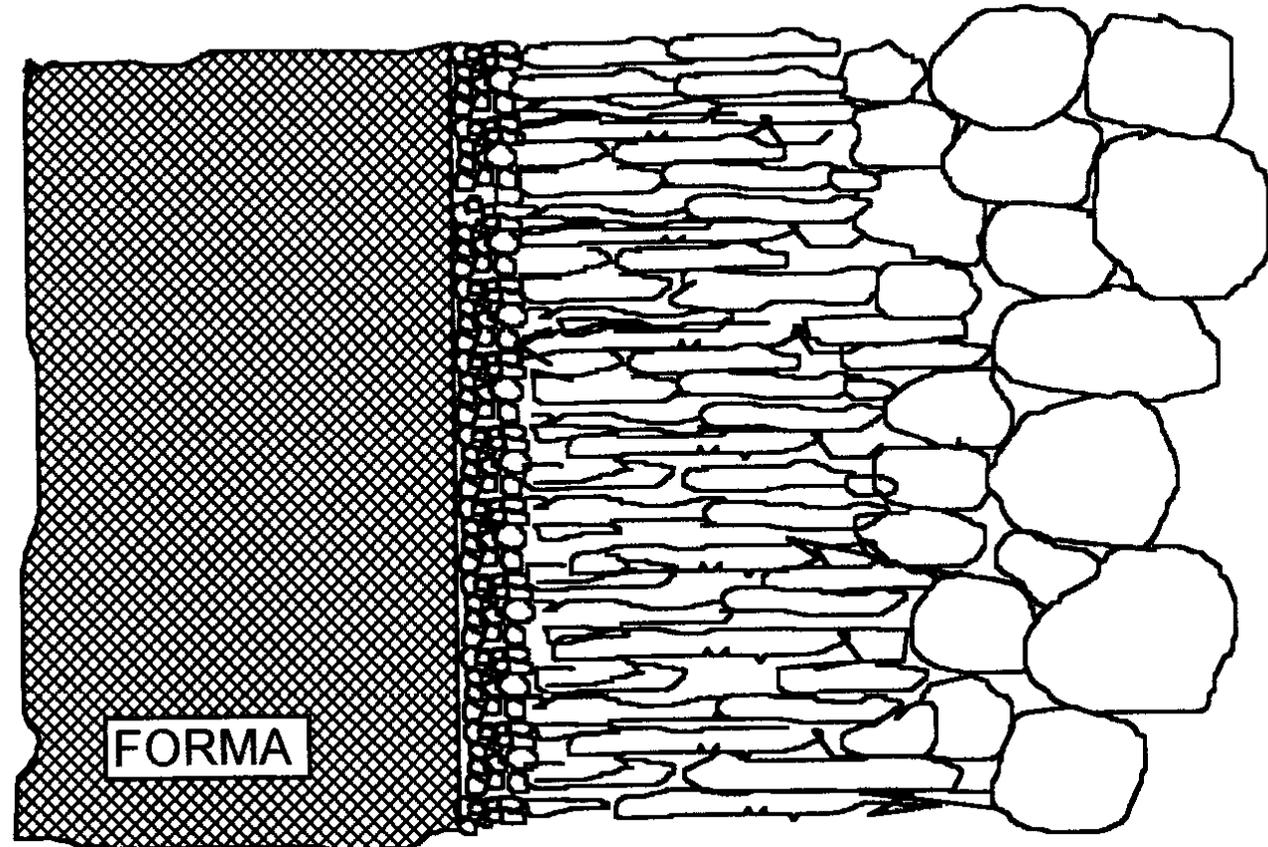




$t = t_3$

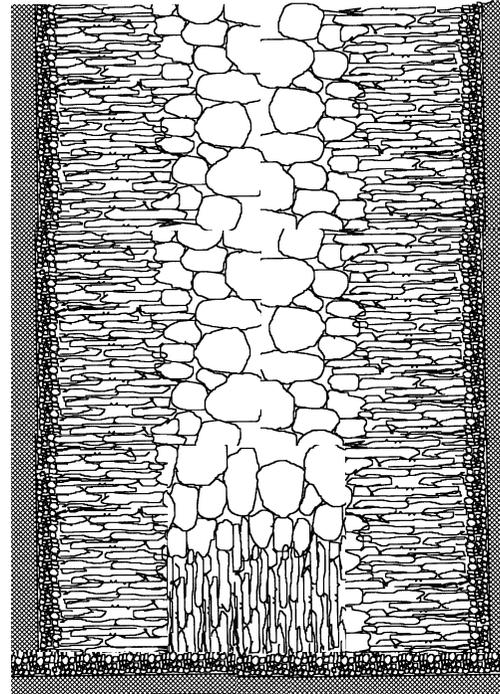
basse differenze di temperature
bassa conducibilità
senza particolare direzione
di sottrazione del calore

----> grani grossi, equiorientati





Tipica struttura finale
di un lingotto

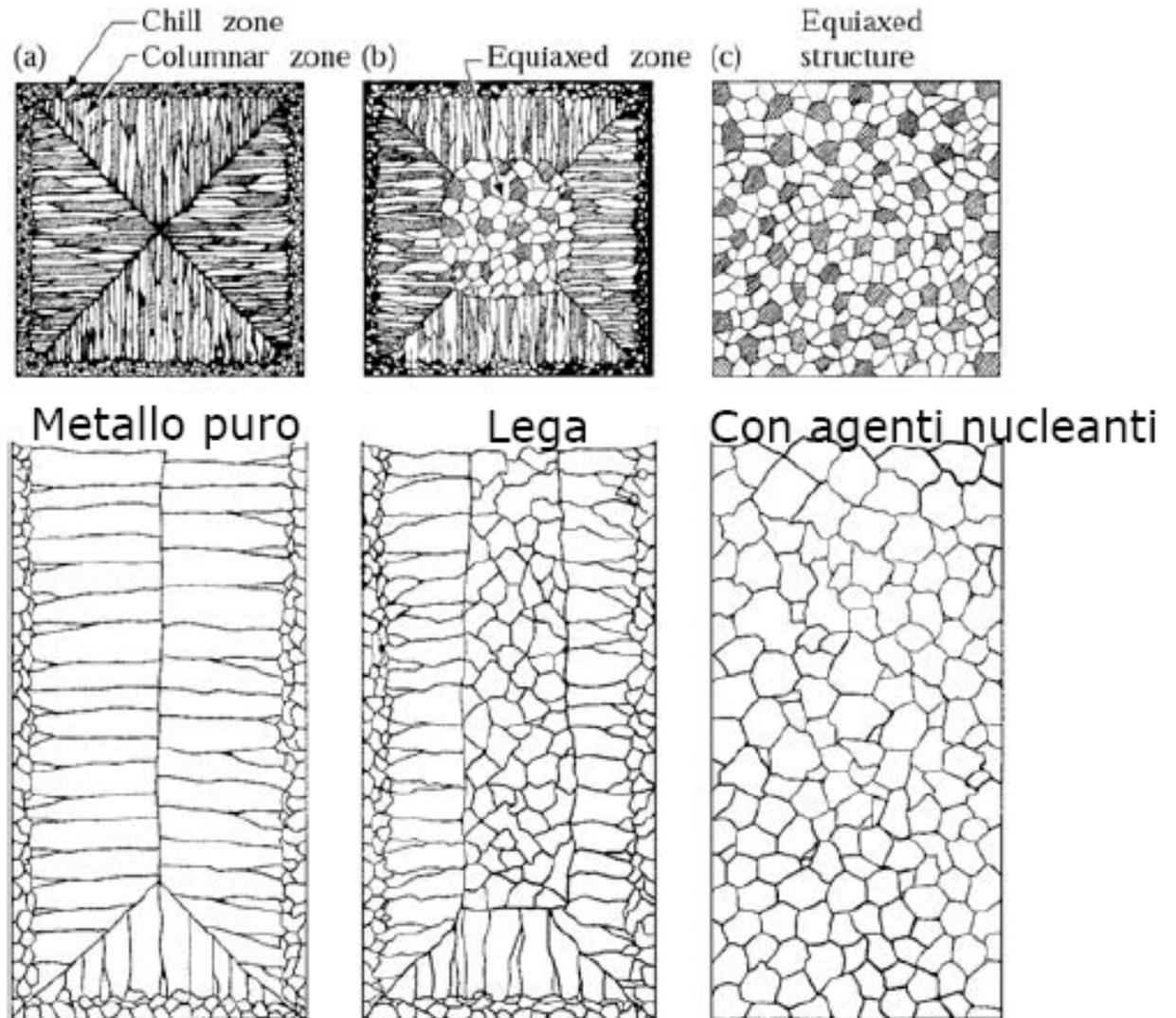


È in genere auspicabile avere:

- elevata velocità di raffreddamento
- spessori ridotti
- aggiunta di elementi nucleanti (nucleazione eterogenea)
- rugosità della forma

“

“



Con diverse composizioni chimiche è comunque possibile influenzare la struttura microcristallina e quindi il comportamento macroscopico

Solidificazione di leghe

dendriti dovute a

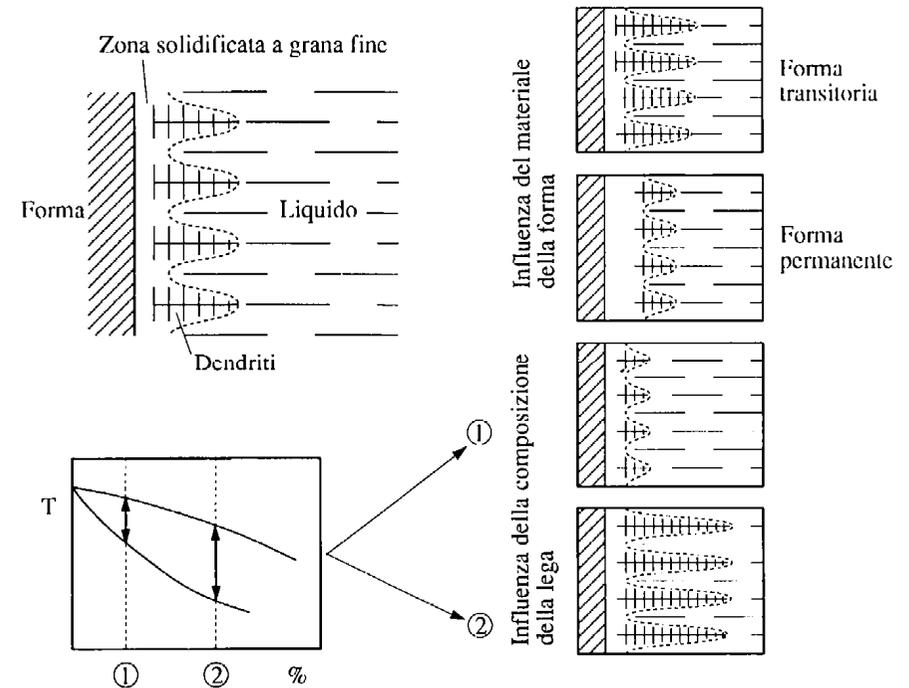
- diverse temperature di solidificazione dei componenti
- direzione preferenziale di asportazione di calore
- velocità di raffreddamento

problemi

- porosità interdendritica
- disomogeneità
- anisotropia
- inneschi a frattura

trattamenti termici

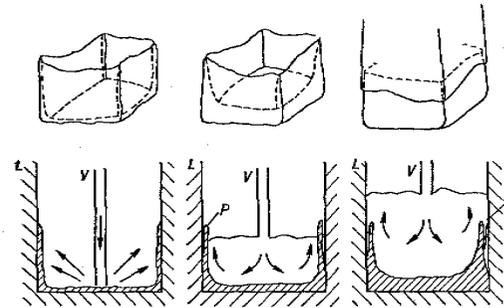
- ricottura
- normalizzazione



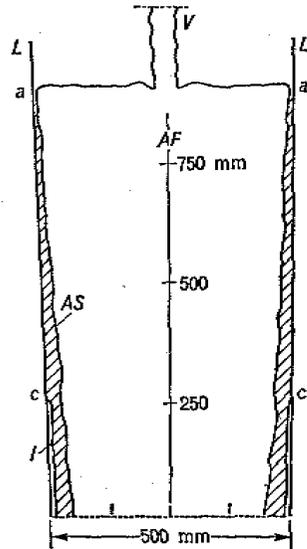


Tipici difetti in un lingotto

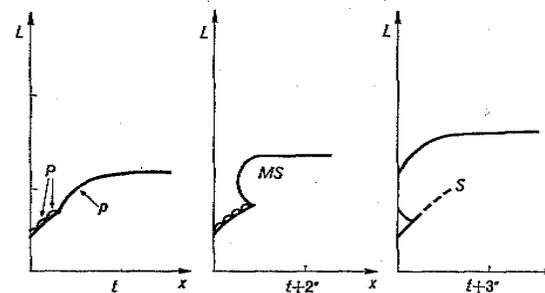
- gocce fredde
- doppia pelle
- tacconi
- riprese di colata
- lesioni superficiali



Spruzzi e formazione della doppia pelle

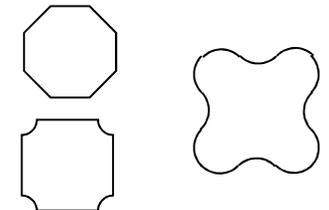


Distacco del lingotto dalla lingottiera con pericolo di rottura e traboccamento del metallo (formazione di tacconi)

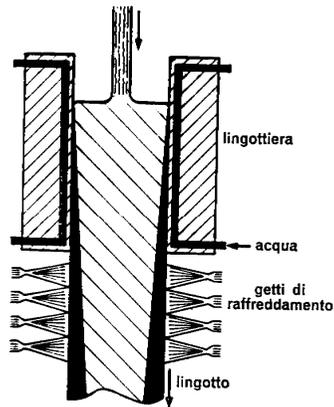
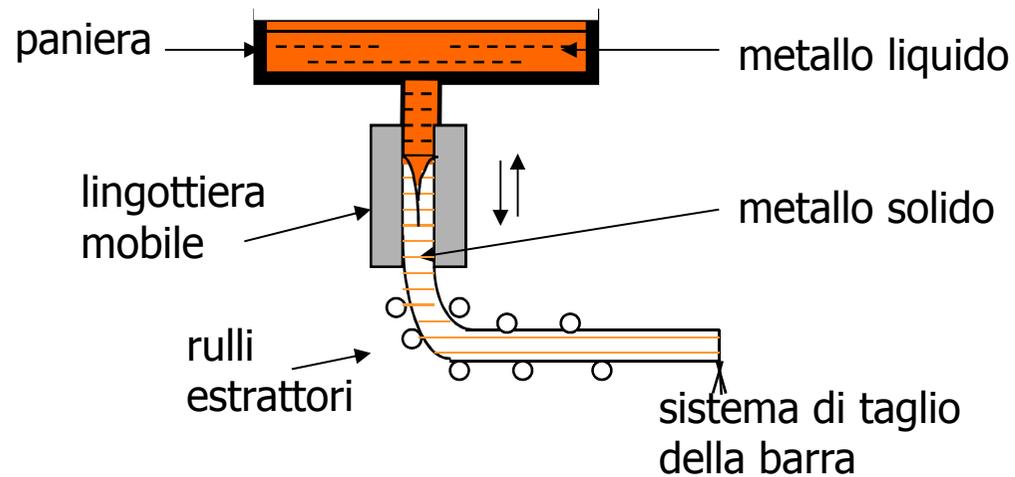


Formazione della ripresa di colata

La tendenza a formare cricche è valutabile dal rapporto:
 velocità di aumento pressione / velocità di asportazione del calore =
 portata/sezione / perimetro/sezione = $Q/S / P/S = Q/P$
 Quindi, per ridurre il pericolo dei cretti si impiega una sezione ondulata (quadrangolare, ottagonale, ecc.).



Colata continua



Lingottiera:
sistema di raffreddamento
andamento della solidificazione

Ottenimento di semilavorati
destinati a successive lavorazioni
per deformazione plastica

in alcuni casi anche prodotti finiti

Ottimizzazione della produzione:

+ produttività
qualità dei prodotti

- costi di impianti



Colata
continua

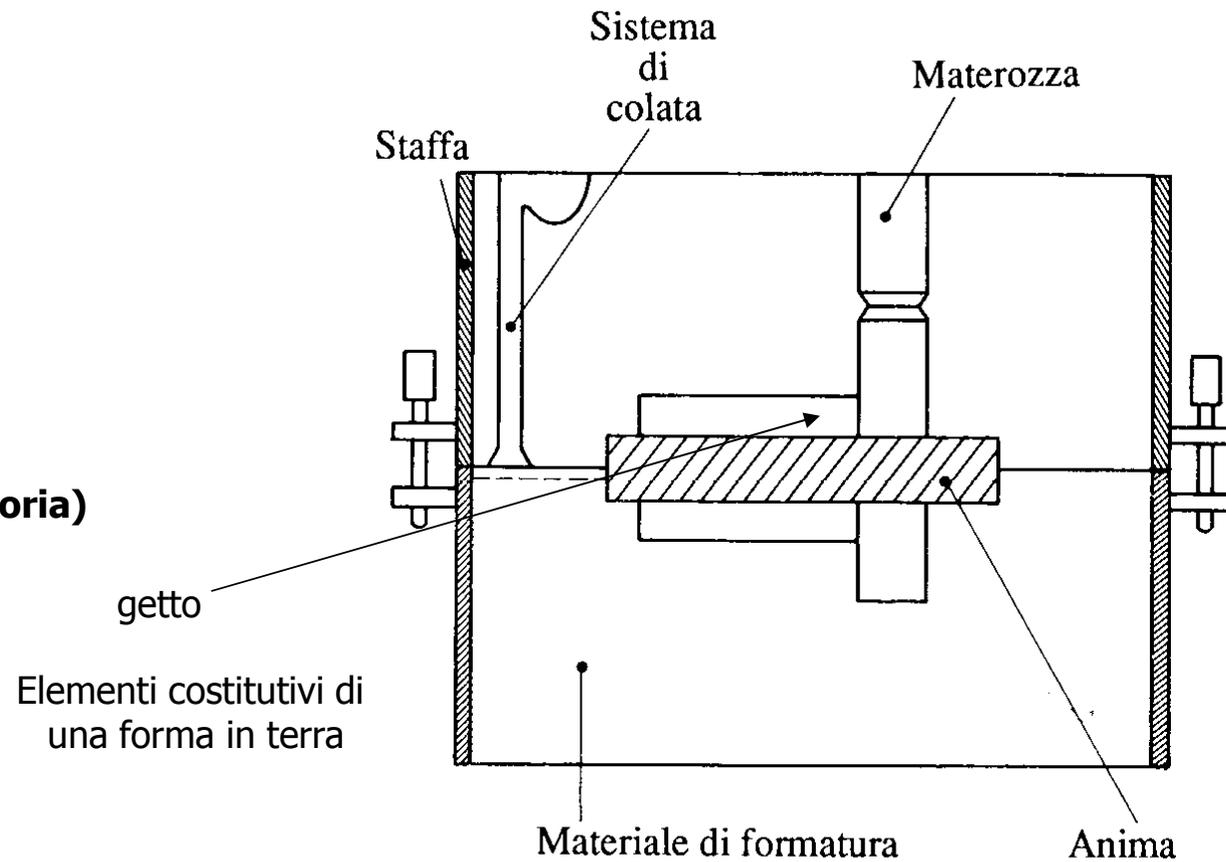


Colata in forma (transitoria o meno)

Getti finiti a meno di:

- trattamenti termici
- lavorazioni di finitura

Colata in terra (forma transitoria)

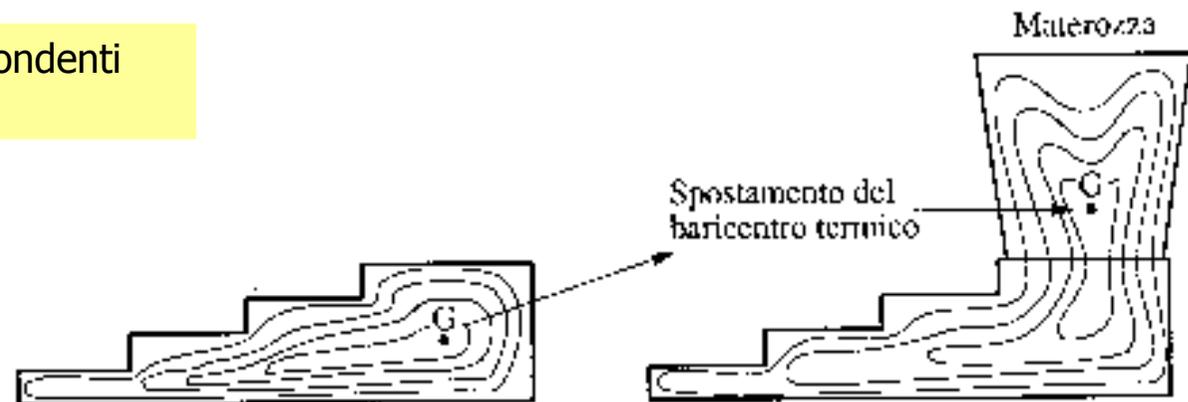


Materozza

→ 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

→ Concentra impurità bassofondenti
all'esterno del getto

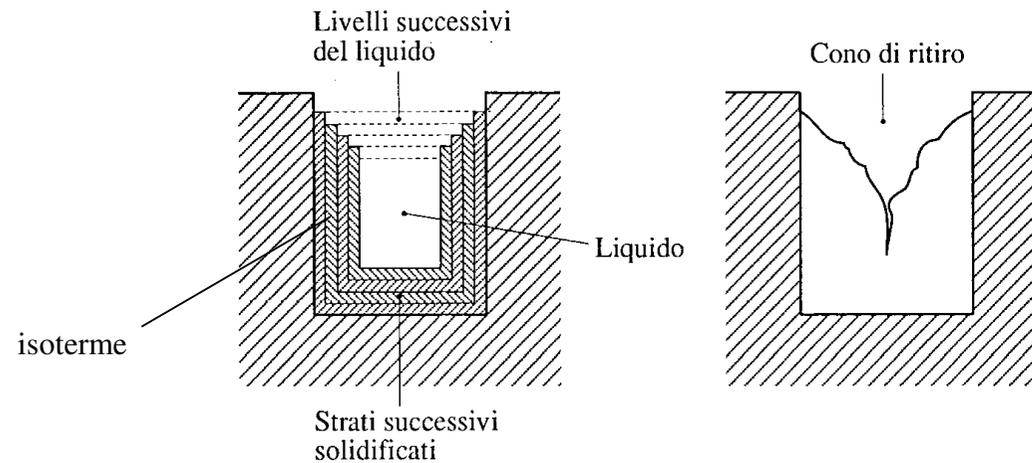
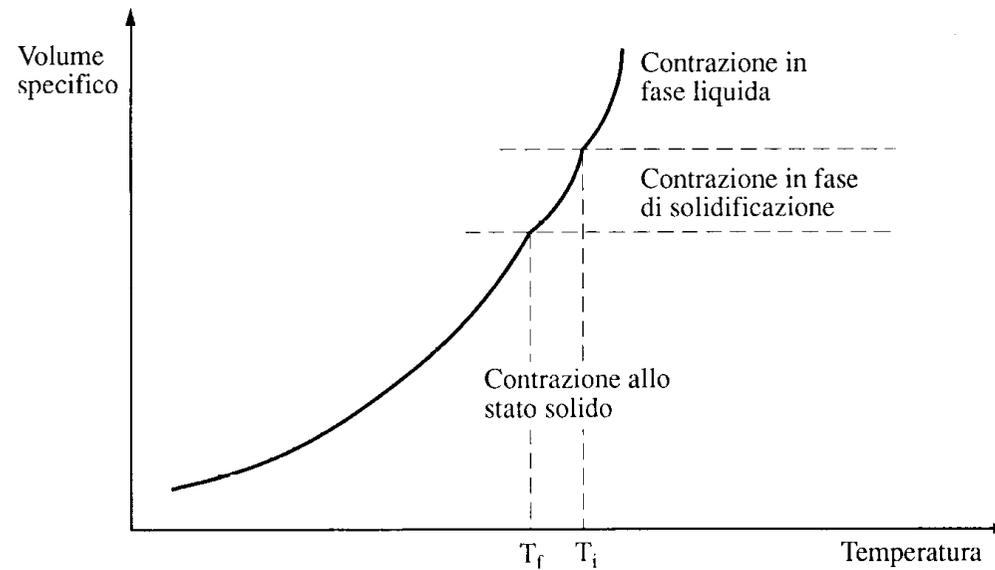


modificazione della distribuzione di temperatura
dovuta alla presenza della materozza

Il ritiro

Se ne tiene conto con:

- aumento dimensioni
forma
- alimentatori (materozze)





Solidificazione direzionale

- Formula empirica di Chorinov per determinare il tempo di solidificazione:

$$t_s = k \left(\frac{V}{S} \right)^n \quad \begin{matrix} n = 1.5 - 2 \\ k = 0.8 - 1.1 \end{matrix}$$

- Modulo termico: $V / S = M$



suddividere il getto in parti a modulo termico crescente verso la materozza

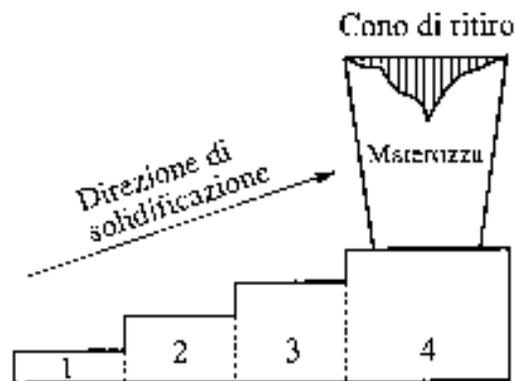
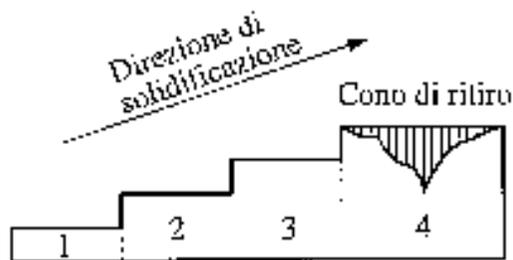


Regola empirica:

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

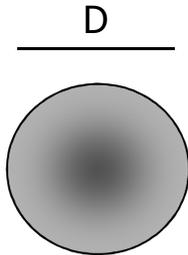
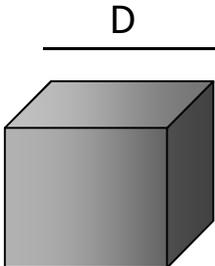
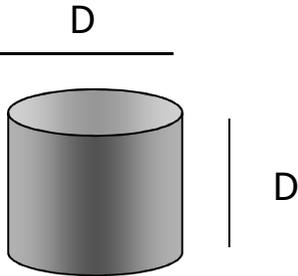
$$\begin{matrix} M_2 = 1,1 M_1 \\ M_3 = 1,1 M_2 \\ M_4 = 1,1 M_3 \end{matrix}$$

$$M_m = 1,2 M_4$$



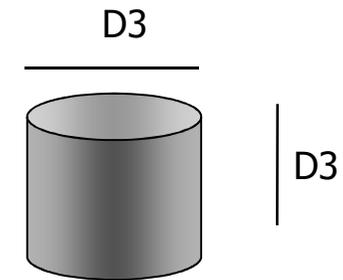
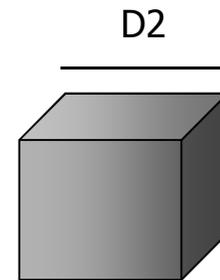
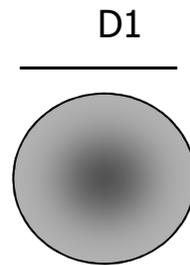


..alcuni esempi:

			
V	$4 / 3 \pi (D/2)^3$	D^3	$\pi (D/2)^2 D$
S	$4 \pi (D/2)^2$	$6 D^2$	$2 \pi (D/2)^2 + \pi D * D$
M	$D / 6$	$D / 6$	$D / 6$
V	0.5	1	0.8



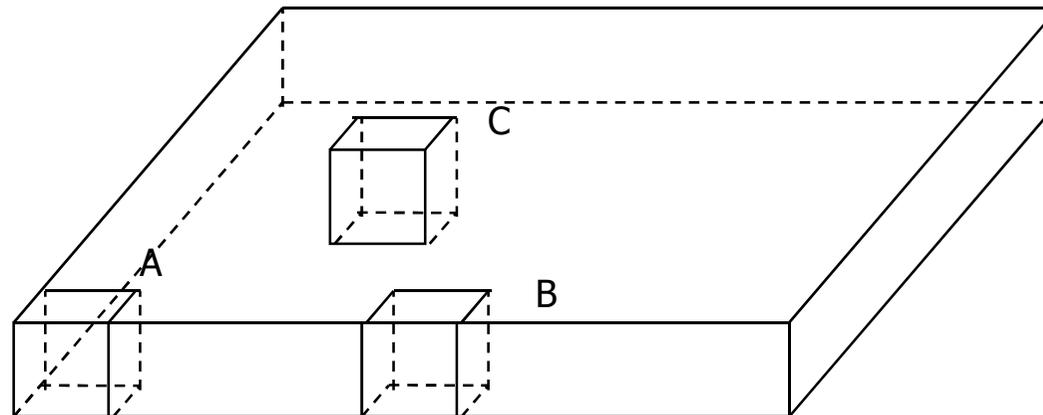
..ancora:



V	1	1	1
Di	1.2	1	1.1
S	4.5	6	5.5
M	0.22	0.16	0.18



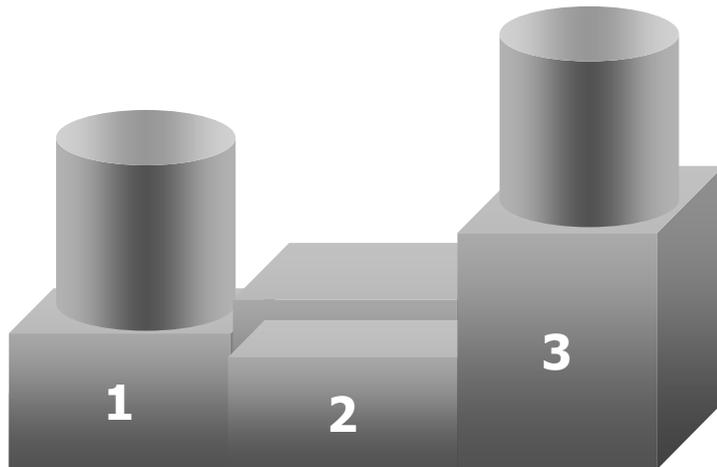
un altro esempio:



V_a	=	V_b	=	V_c	=	L^3		
S_a	=	$4 L^2$	S_b	=	$3 L^2$	S_c	=	$2 L^2$
M_a	=	$L / 4$	M_b	=	$L / 3$	M_c	=	$L / 2$



Inconvenienti e rimedi



Problema di solidificazione

Soluzioni:

Diminuire spessore di 1

Aumentare spessore di 2

Aggiungere materozza in 1



Dimensionamento del sistema di alimentazione

Obiettivo: determinare forma e dimensioni della materozza

si usa il diagramma di Caine (sperimentale)

$$X = \frac{M_m}{M_g} \quad \text{tempo di solidificazione relativo}$$

Modulo dell'ultima parte a solidificare prima della materozza

$$M_g = \text{Max}_i M_i$$

$$Y = \frac{V_m}{V_g} \quad \text{volume relativo}$$

Volume del getto

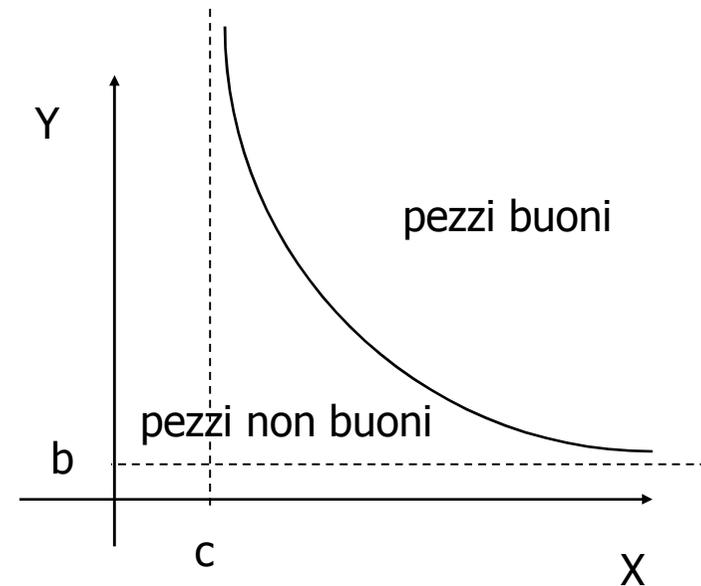


Diagramma di Caine



analiticamente $Y \geq \frac{a}{X-c} + b$

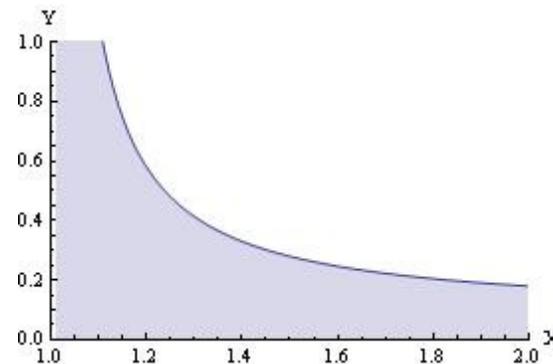
oppure $X \geq \frac{a}{Y-b} + c$

b = ritiro in fase liquida rappresenta il minimo valore di y quando $x \rightarrow \infty$

c = costante che dipende dalle condizioni relative di smaltimento di calore fra getto e materozza (=1 se uguali)

a = costante sperimentale dipendente dal materiale da colare (≈ 0.1)

$$\begin{cases} a = 0.1 \\ c = 1.0 \\ b = 8\% \end{cases} \longrightarrow$$





Da cui ottengo il volume e la superficie di scambio della materozza

Però lo stesso modulo e lo stesso volume si possono ottenere con infinite forme e dimensioni della materozza

1° metodo

Fissare un certo numero di parametri

2° metodo

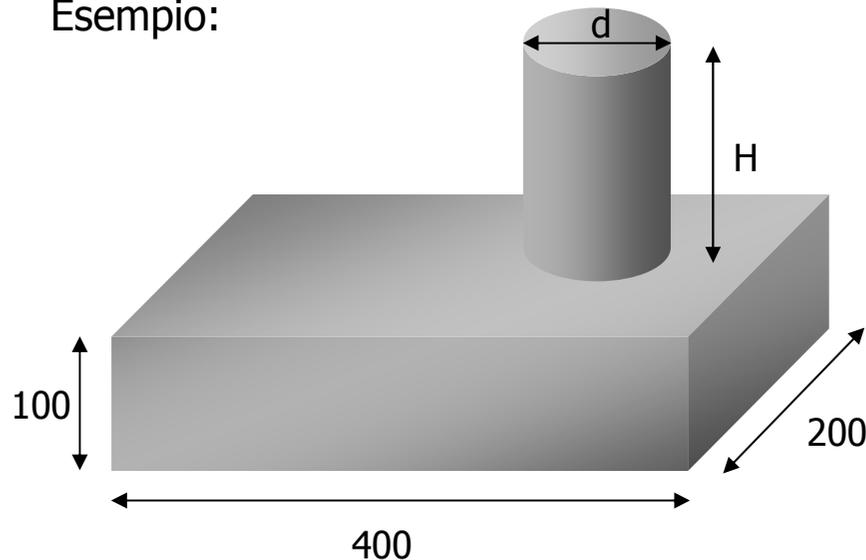
Costruire una formulazione analitica

Al fine di determinare la geometria (forma e dimensioni)



1° metodo

Esempio:



Scelgo una forma cilindrica della materozza

Altezza delle staffe pari a 250

$$H = 250 - 100 = 150$$

$$V_g = 4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{2^3} = 8 \cdot 10^6$$

$$M_g = \frac{4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{2^3}}{2(4 \cdot 2 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{2^2}} = \frac{8 \cdot 10^2}{2 \cdot 14} = 28.5714$$



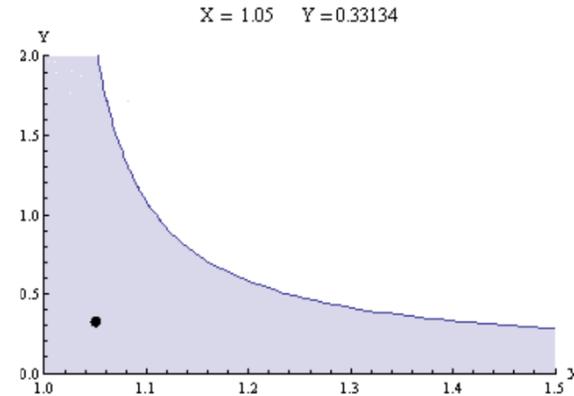
Scelgo: $d = 150$

$$V_m = \frac{\pi \cdot d^2 H}{4} = \frac{\pi \cdot 150^2 \cdot 150}{4} = 2650000$$

$$S_m = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dH = \frac{\pi \cdot 150^2}{4} + \pi \cdot 150 \cdot 150 = 88357$$

$$M_m = 30$$

$$X = 1.05 \rightarrow Y = 0.33 < Y_{Caine} = 2.08$$



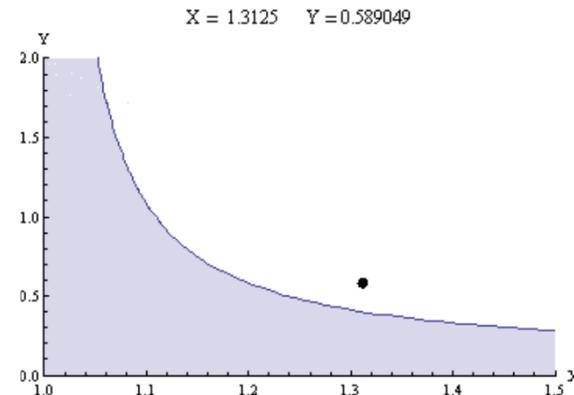
Scelgo: $d = 200$

$$V_m = \frac{\pi \cdot 200^2 \cdot 150}{4} = 4710000$$

$$S_m = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dH = \frac{\pi \cdot 200^2}{4} + \pi \cdot 200 \cdot 150 = 125664$$

$$M_m = 37.5$$

$$X = 1.31 \rightarrow Y = 0.59 > Y_{Caine} = 0.4$$



Il procedimento è analogo nel caso in cui sussistano dei vincoli causati dagli ingombri della materozza (e quindi su d)



Oppure:

Scelgo: $X = 1.25$

$$Y = \frac{0.1}{X - 1} + 0.08 = 0.48$$

$$V_m = Y \cdot V_g = 3.84 \cdot 10^6$$

$$\frac{\pi \cdot d^2 H}{4} = \frac{\pi \cdot d^2 150}{4} = 3.84 \cdot 10^6 \rightarrow d = 180.54$$

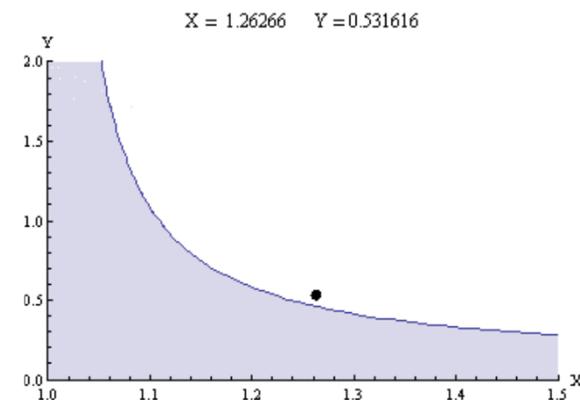
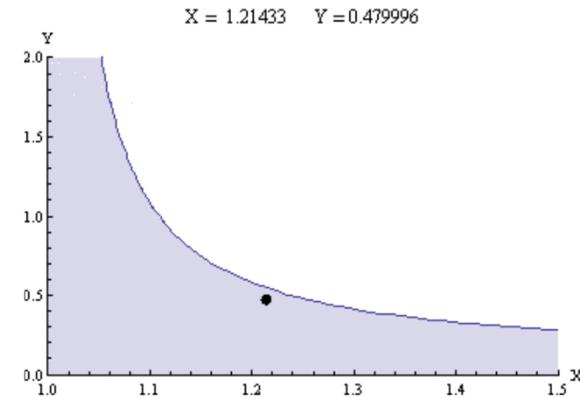
Prendo $d = 190$

$$V_m = \frac{\pi \cdot 190^2 150}{4} = 4250000$$

$$S_m = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d H = \frac{\pi \cdot 190^2}{4} + \pi 190 \cdot 150 = 117888$$

$$M_m = 36.08$$

$$X = 1.26 \rightarrow Y = 0.53 > Y_{Caine} = 0.46$$





2° metodo costruire una formulazione analitica

$$Y \geq \frac{a}{X - c} + b$$

$$Y = \frac{V_m}{V_g} = f(\text{geometriadelpezzo}, \text{geometriadellamaterozza})$$

$$X = \frac{M_m}{M_g} = f(\text{geometriadelpezzo}, \text{geometriadellamaterozza})$$

Vincolata da:

Altezza delle staffe
Ingombro della materozza

Al fine di determinare:

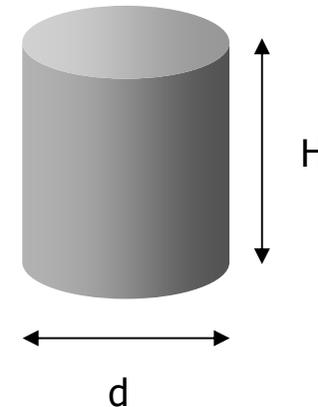
Geometria
Numero
Posizionamento
della/e materozza/e



Caso di materozza cilindrica:

$$V_m = \frac{\pi d^2 H}{4} \quad S_m = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dH$$

$$\left. \begin{array}{l} M_m = \frac{d \cdot H}{d + 4H} \\ M_m = X \cdot M_g \end{array} \right\} \rightarrow d = \frac{(d + 4H) M_g X}{H}$$



$$Y = \frac{V_m}{V_g} = \frac{V_m}{V_g} \cdot \frac{\left(\frac{(d + 4H) M_g X}{H} \right)^3}{d^3} = \frac{(d + 4H)^3 M_g^3 \pi X^3}{4d \cdot H^2 \cdot V_g}$$

Equazione che lega le caratteristiche geometriche del getto e della materozza alle variabili di Caine



Determino il punto di confine tra pezzi cattivi e pezzi buoni mettendo a sistema l'equazione precedente con quella sperimentale del diagramma di Caine

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = \frac{(d + 4H)^3 M_g^3 \pi X^3}{4d \cdot H^2 \cdot V_g} \\ Y = \frac{a}{X - c} + b \end{array} \right.$$

Il risultato in forma chiusa può essere trovato determinando il valore reale positivo di X in funzione di d , H , Mg , Vg

Attenzione: Mg è funzione di d



Soluzione in forma chiusa di $X = f [d , H , Mg , Vg]$



In prima approssimazione si può trascurare la variazione di Mg in funzione del diametro della materozza

Fissati i valori di Mg e Vg, il punto di intersezione di coordinate {X,Y} sarà funzione di d e H

Si ottiene:
$$Y = \frac{(d + 4H)^3 \pi X^3}{1372 \cdot d \cdot H^2}$$
 Famiglia di funzioni $Y = f_{d,H} [X]$ con 2 gradi di variabilità

Se pongo: $H = \delta \cdot d \longrightarrow \delta$ fattore di forma della materozza cilindrica

$$Y = \frac{M_g^3 \pi X^3 (d + 4d \cdot \delta)^3}{4d^3 \cdot \delta^2 \cdot V_g} = \frac{M_g^3 \pi X^3 (1 + 4\delta)^3}{4 \cdot \delta^2 \cdot V_g}$$
 Famiglia di funzioni $Y = f_{\delta} [X]$ con 1 solo grado di variabilità



Per la materozza:

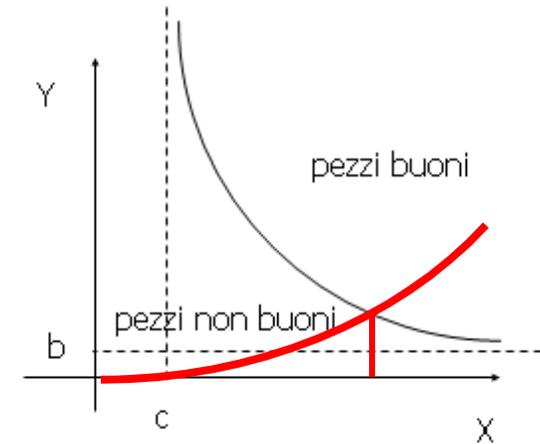
$$V_m = \frac{\pi d^3 \delta}{4}$$

$$S_m = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d^2 \delta$$

$$M_m = \frac{d \cdot H}{d + 4H} = d \frac{\delta}{1 + 4\delta}$$

Scegliendo un valore di δ è ora possibile mettere a sistema l'equazione di Caine con quella relativa alla geometria:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = \frac{a}{X - c} + b \\ Y = \frac{M_g^3 \pi X^3 (1 + 4\delta)^3}{4 \cdot \delta^2 \cdot V_g} \end{array} \right.$$



Da cui ricavo il valore di X

$$M_m = X \cdot M_g = d \frac{\delta}{1 + 4\delta}$$

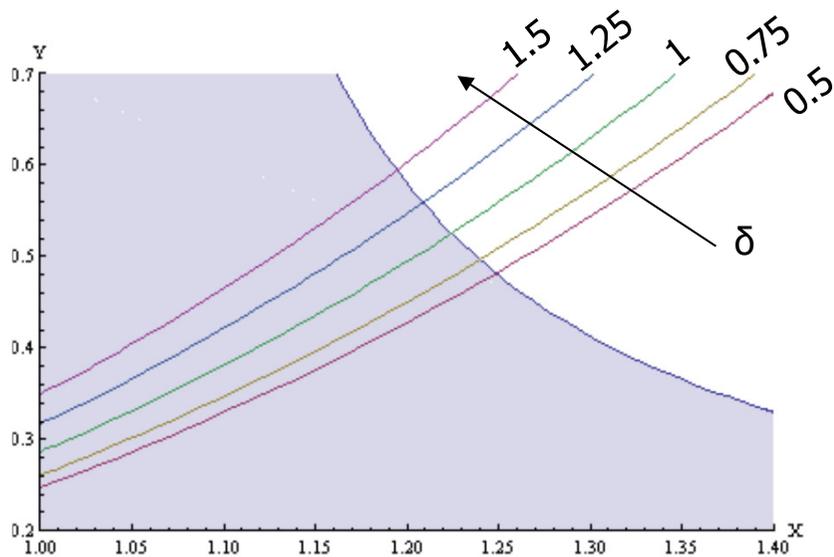
da cui ottengo il valore di d

$$H = \delta \cdot d$$



Con i dati dell'esempio precedente:

$$Y = 0.146546 \cdot \frac{(0.25 + \delta)^3}{\delta^2} X^3$$



Scegliendo ad esempio $\delta = 1$

$$\begin{cases} Y = 0.2862 \cdot X^3 \\ Y = \frac{0.1}{X-1} + 0.08 \end{cases} \rightarrow X = \begin{cases} -0.21 \\ -0.007 - 0.52i \\ -0.007 + 0.52i \\ 1.22 \end{cases}$$

$$M_m = X \cdot M_g = d \frac{\delta}{1 + 4\delta}$$

$$34.98 = d \frac{1}{1 + 4 \cdot 1} \rightarrow d = 174.9$$

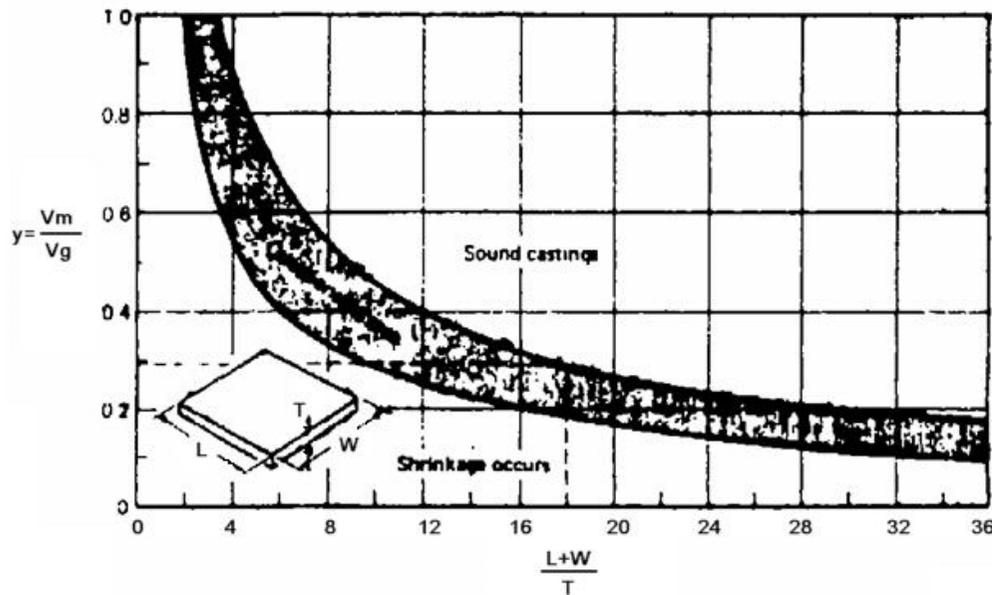
$$H = 174.9$$

Metodo di Bishop - Pellini

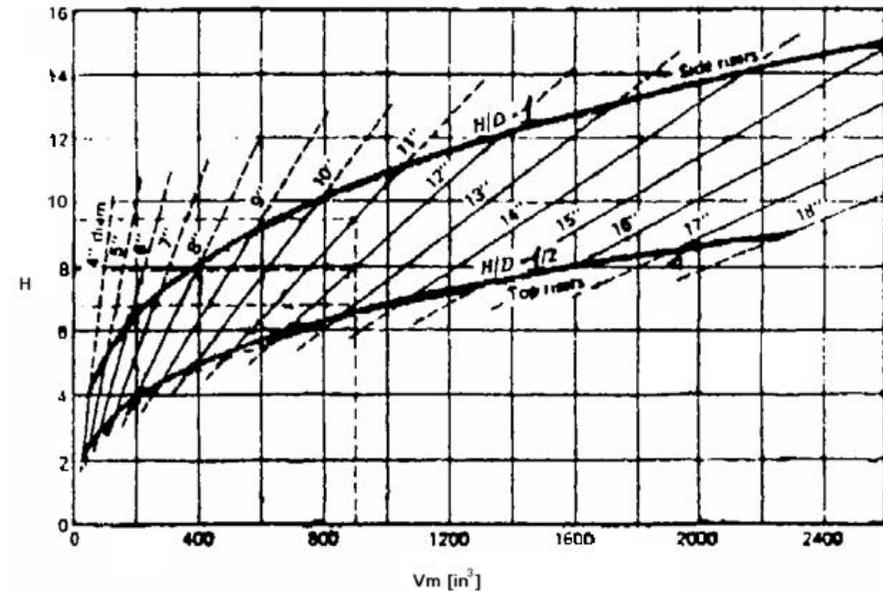
Valuta l'efficienza di una materozza in funzione del fattore di forma del getto:

$$y = \frac{L+W}{T}$$

- dal diagramma (a) si può calcolare Y
- conoscendo V_g si può calcolare V_m
- dal diagramma (b), fissato δ , si può ricavare H e D



(a)

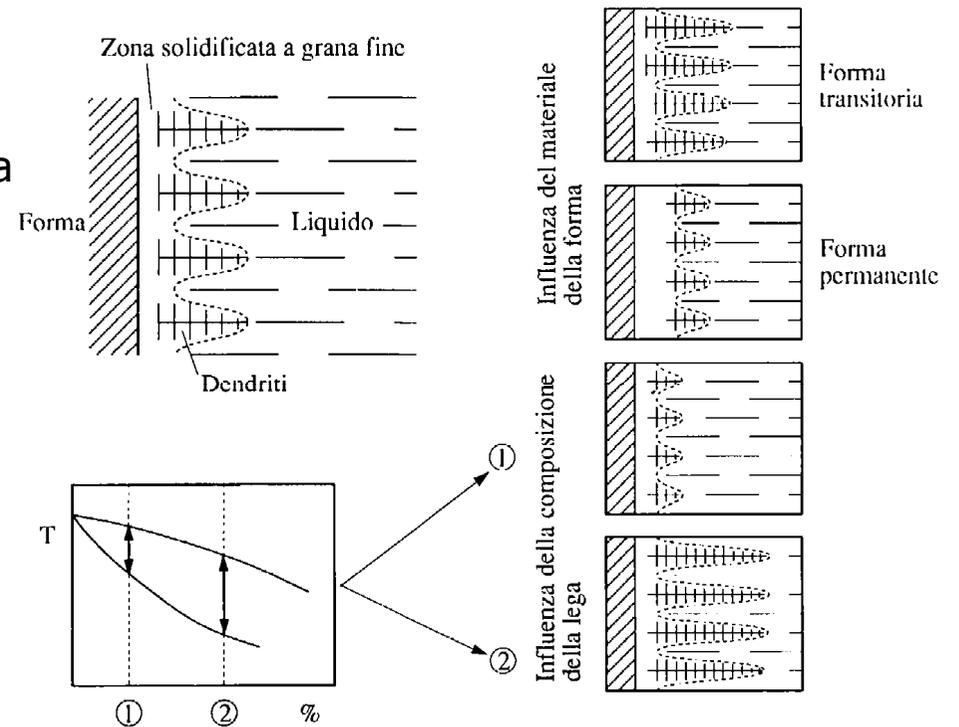
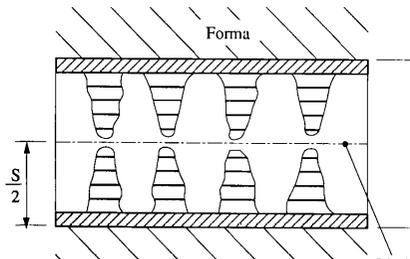


(b)

Raggio d'azione delle materozze

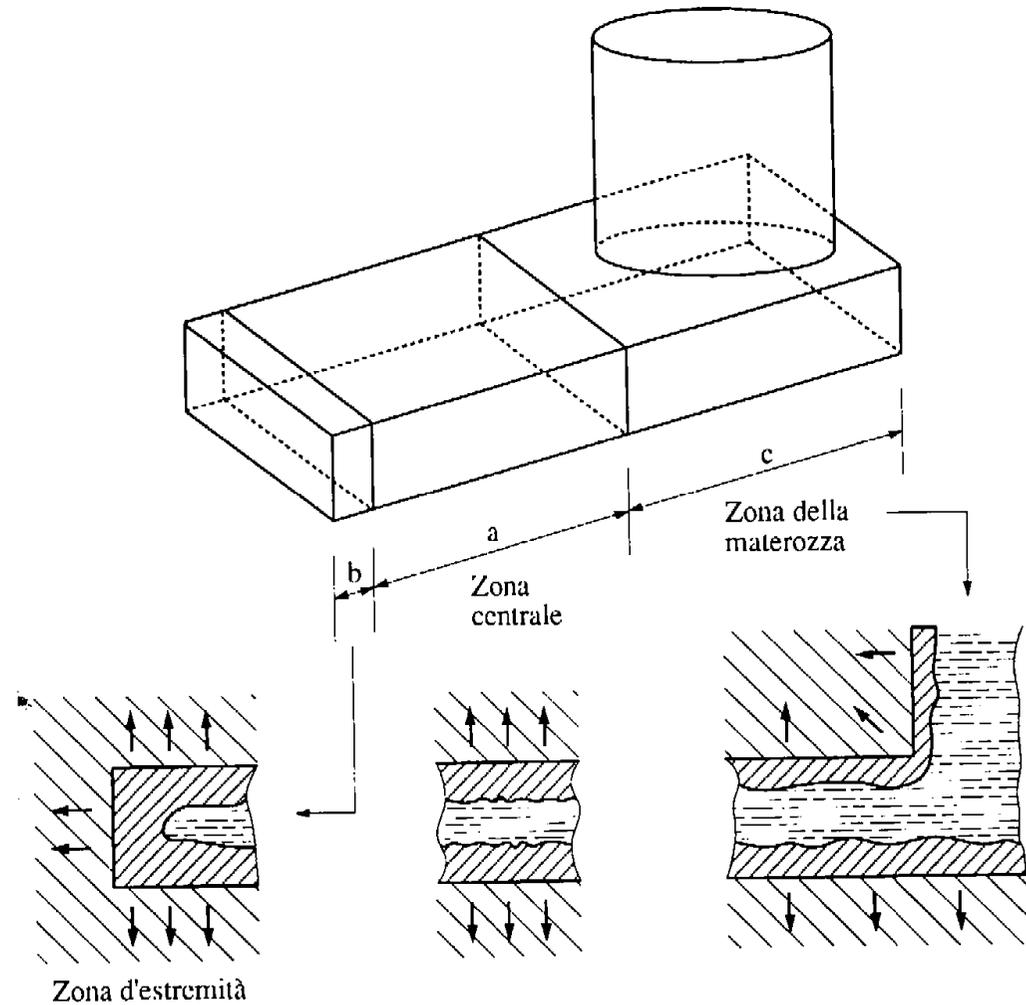
Meccanismo di solidificazione dendritica

Nel caso delle piastre, o in getti con parete sottile, può portare a chiusura del collegamento fra la zona che sta solidificando e la materozza, con conseguente formazione di cavità all'interno del getto





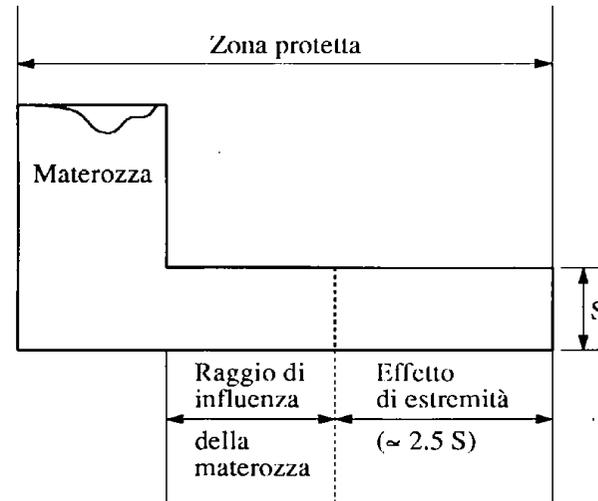
Solidificazione di una piastra con effetto di estremità e materozza





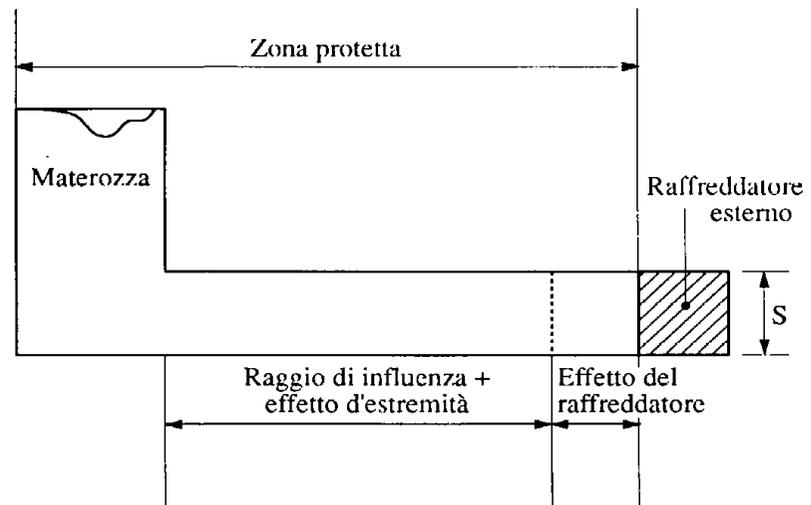
zona di influenza materozza

acciaio	3 - 5 s
ghisa	4 - 5 s
bronzo	6 - 8 s
leghe leggere	5 - 7 s



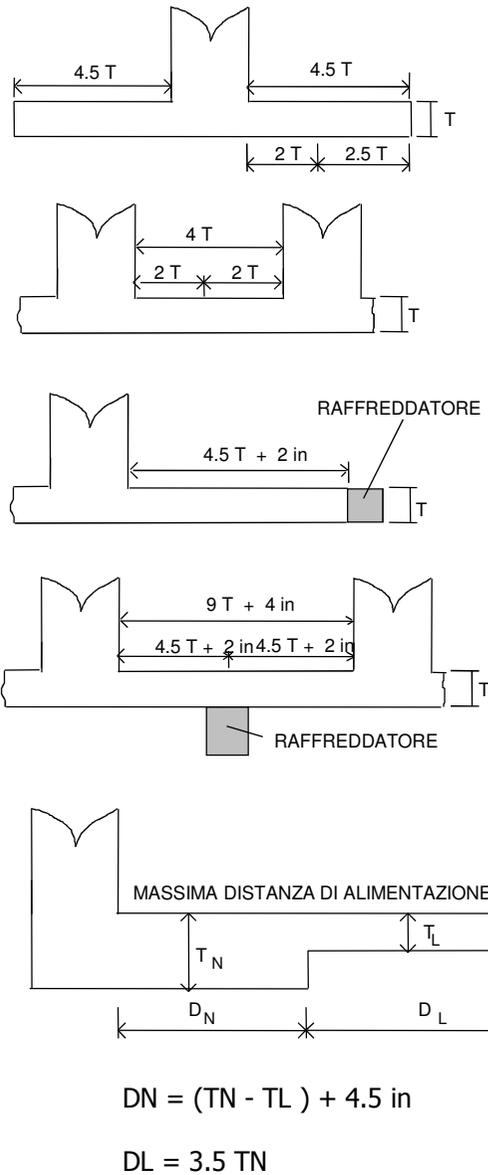
effetto di bordo 2.5 s

raffreddatori 50 mm

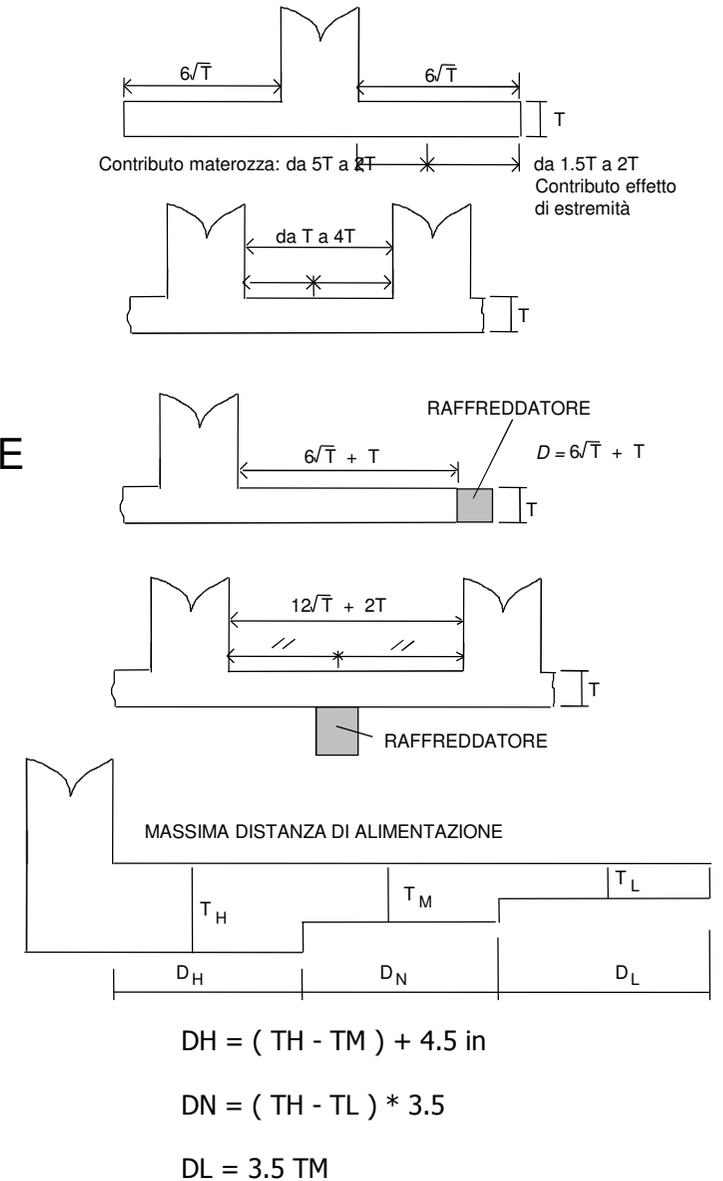




PIASTRE



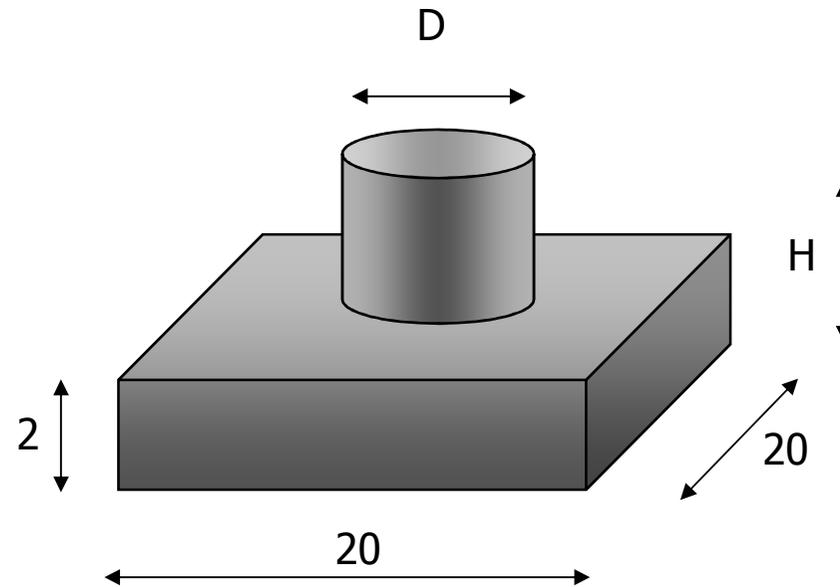
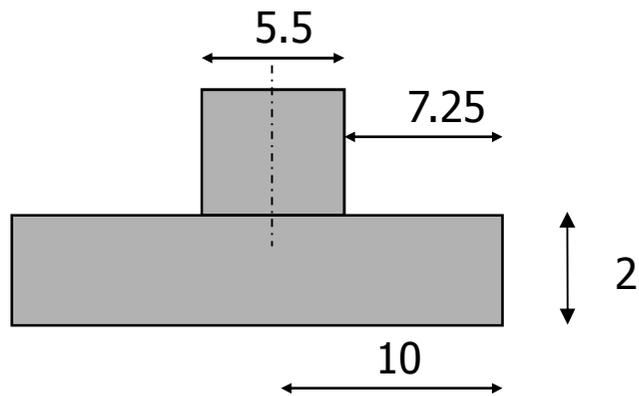
BARRE





Esempio

$\delta = 1 \rightarrow D = 5.5$



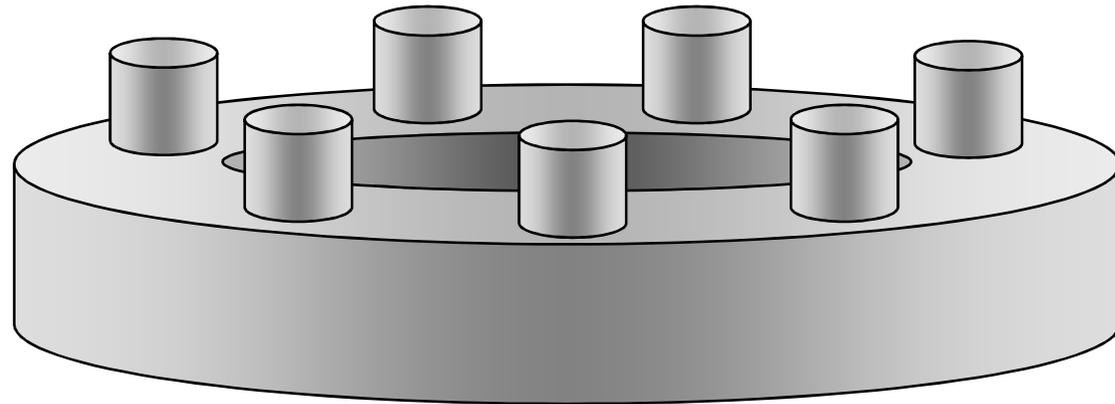
$A_{max} = 4.5 T = 9 > 7.25$



Altro esempio

$$\varnothing = 400$$

$$T = 30$$



progetto:

$$D_m = 50$$

$$A_{\max} = 50 + 4 \cdot 30 = 170$$

$$\pi \cdot \frac{400}{170} = 7.4 \rightarrow 8$$

verifica:

7 materozze

$$\pi \cdot \frac{400}{7} = 179$$

$$179 = D + 4 \cdot 30 \rightarrow D = 59$$

A parità di H la soluzione con 7 materozze verifica il diagramma di Caine in quanto ci siamo spostati in alto e a destra

Si ha un risparmio o un aumento di materiale (sprecato) delle materozze?

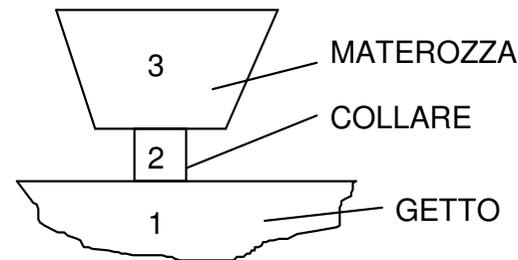
$$\frac{V_7}{V_8} = \frac{7 \cdot D_7^2}{8 \cdot D_8^2} = 1.218 \longrightarrow$$

Conviene utilizzare 8 materozze piccole

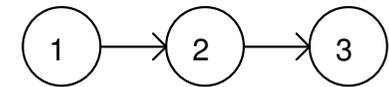


Collare di attacco delle materozze

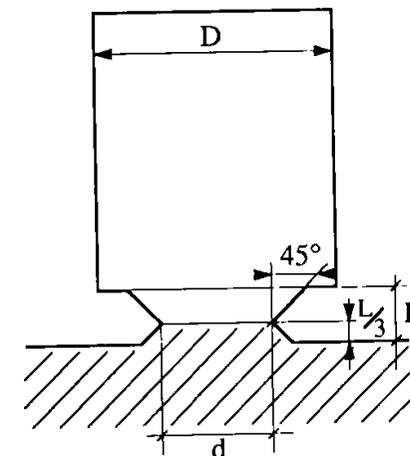
- non strozzatura per evitare solidificazione prematura
- piccola sezione per facilitare asportazione
- superfici piane piuttosto che curve
- in corrispondenza a zone da lavorare successivamente



ORDINE DI SOLIDIFICAZIONE



	d	L
acciaio	0.4 D	0.16 D
ghisa	0.66 D	0.16 D
rame	0.66 D	0.35 D
leghe leggere	0.75 D	0.49 D

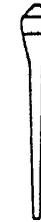
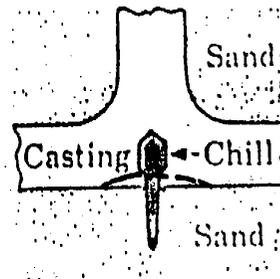




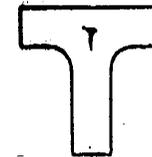
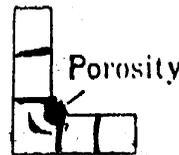
RAFFREDDATORI

Variatione locale del
modulo termico per:
- aumentare raggio
d'azione delle materozze
- favorire solidificazione
direzionale

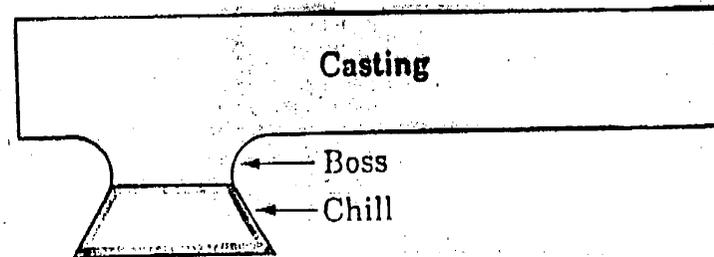
interni
(fusione)



esterni
(sottrazione)

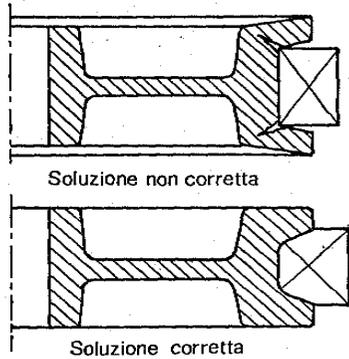


posizionamento

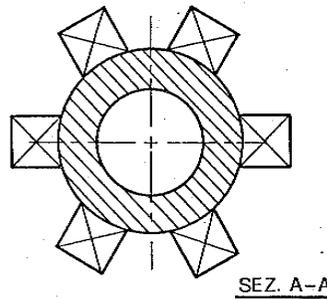
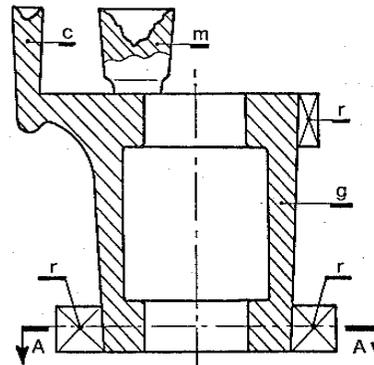




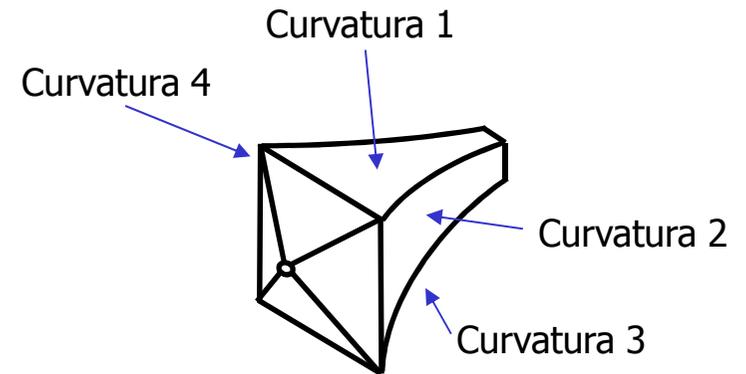
Forme e posizionamento dei raffreddatori



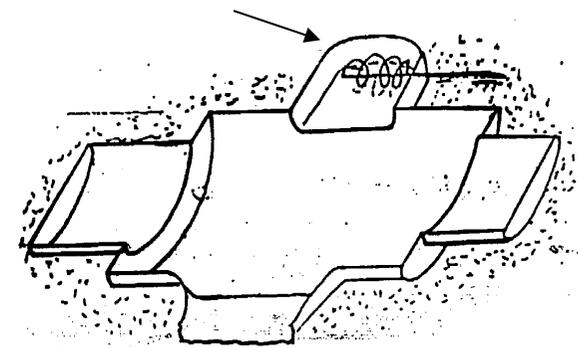
Cricche a caldo dovute alla forma non corretta dei raffreddatori



Posizionamento
raffreddatori



Spirale di raffreddamento

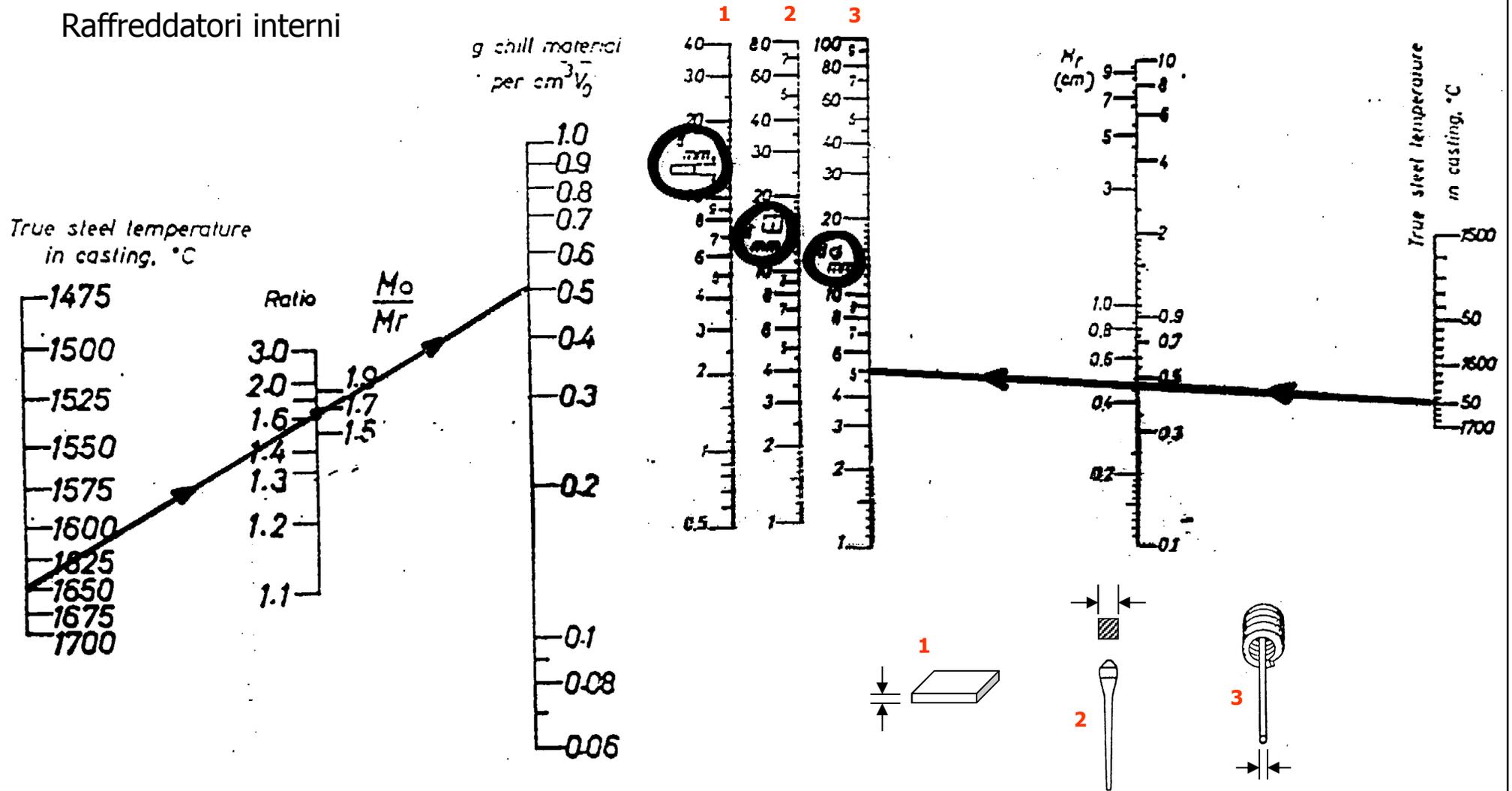




Type	Sketch	Calculation	Type	Sketch	Calculation
Platelike castings		Without chill: $M_0 \approx d/2$	Iugs, etc.		$M_{r \max} = \frac{D(a+d)}{4(D+d)}$ $a \approx \frac{0.95 D d}{1.05 D - 2d}$
		$M_{r \max} \approx M_0/2$ $\approx d/4$			Without chill $M_0 = \frac{A \cdot B}{2(A+B)}$
		$M_{r \max} \approx 2/3 M_0$ $\approx d/3$			$M_{r \max} = \frac{A \cdot B}{2(A+2B)}$
		$M_{r \max} \approx 1/3 M_0$ $\approx d/6$			$M_{r \max} = \frac{A \cdot B}{3A+2B}$
Iugs, etc.		Without chill $M_0 = \frac{D(a+d)}{2(D+2a)}$	Rod and bar-shaped castings		$M_{r \max} = \frac{A \cdot B}{2(2A+B)}$
		$M_{r \max} = \frac{D(a+d)}{4(D+a)}$ whence: $a \approx \frac{0.95 D d}{1.05 D - 2d}$			$M_{r \max} = \frac{A \cdot B}{3A+4B}$
		$M_{r \max} = \frac{D(a+d)}{3D+4a}$ $a \approx \frac{0.45 D d}{1.05 D - 2d}$			$M_{r \max} = \frac{A \cdot B}{4(A+B)}$



Raffreddatori interni

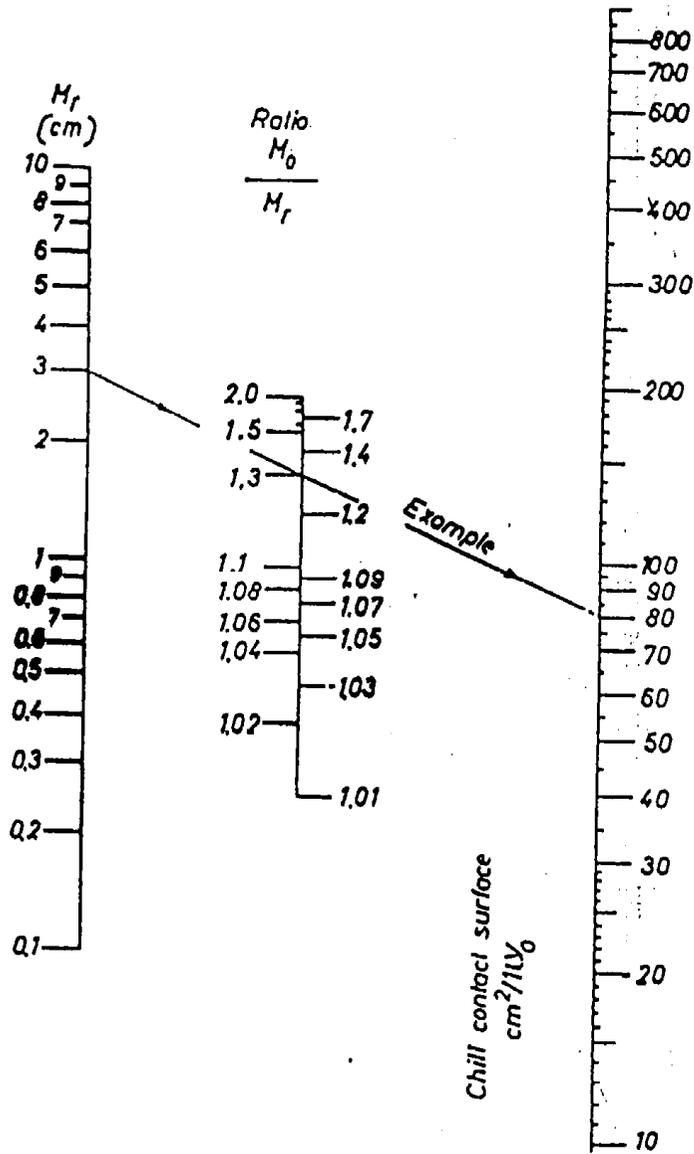




Raffreddatori esterni

$$A_{chill} = \frac{V_0(M_0 - M_r)}{M_0 M_r}$$

with air gap

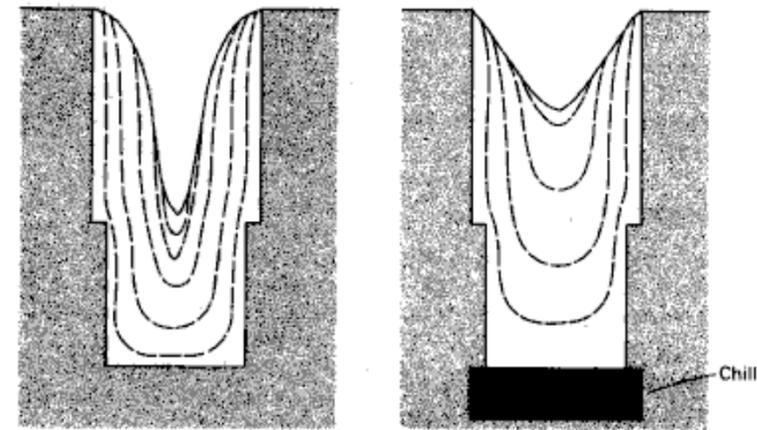




Metodi per ridurre le dimensioni delle materozze

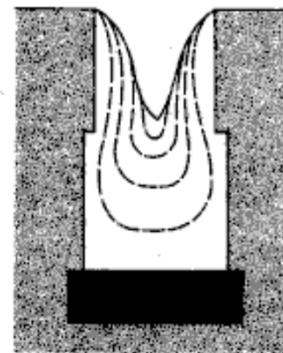
Raffreddatori

Coibentatori

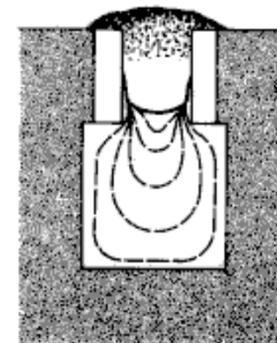


(a)

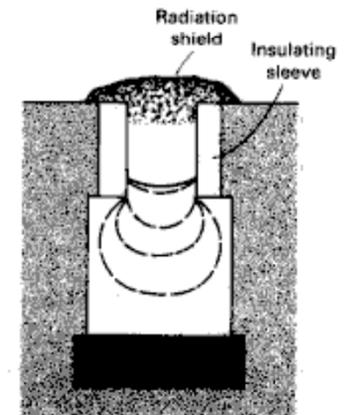
(b)



(c)



(d)



(e)

Methods of controlling shrinkage in an iron cube to reduce riser size. (a) Open-top riser. (b) Open-top riser plus chill. (c) Small open-top riser plus chill. (d) Insulated riser. (e) Insulated riser plus chill