

Processi di fusione e colata, parte I

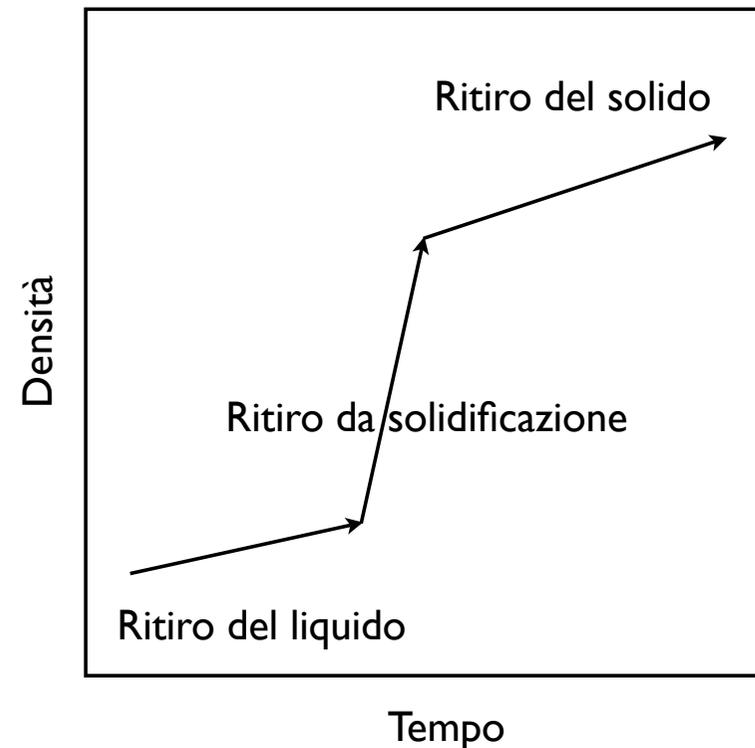
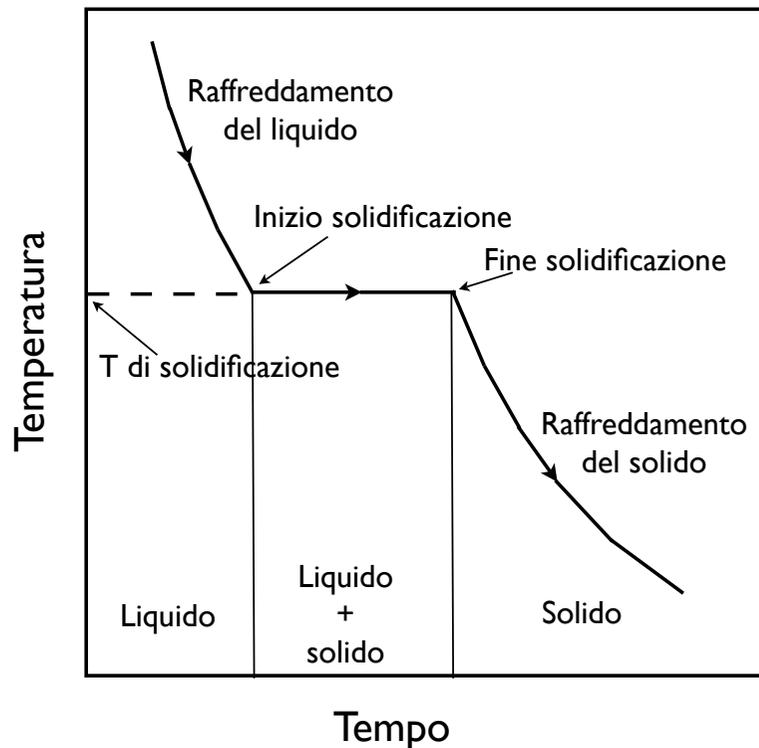
Solidificazione dei metalli
Strutture da solidificazione
Calore e flussi
Pratica della fusione e forni
Leghe da getto

Processi di colata (metalli)

- Il processo di colata è uno dei processi di formatura più antichi e risale al 4000 a. C.
- Consiste nel fondere del metallo e versarlo in uno stampo dove solidifica e da cui viene poi estratto assumendo la forma dello stampo
- Oggigiorno si possono produrre forme molto complicate per fusione e pezzi precisi che in alcuni casi non richiedono lavorazioni successive
- Si cerca di migliorare il processo di colata per ottenere pezzi sempre più omogenei, precisi e privi di difetti
- I fattori fondamentali sono: solidificazione del metallo, flusso del metallo nello stampo, trasporto del calore, materiale e caratteristiche dello stampo.

Solidificazione dei metalli

- I metalli puri al contrario delle leghe solidificano ad una temperatura unica e fissa
- Alla temperatura di solidificazione il metallo produce il calore latente di fusione e la temperatura rimane costante

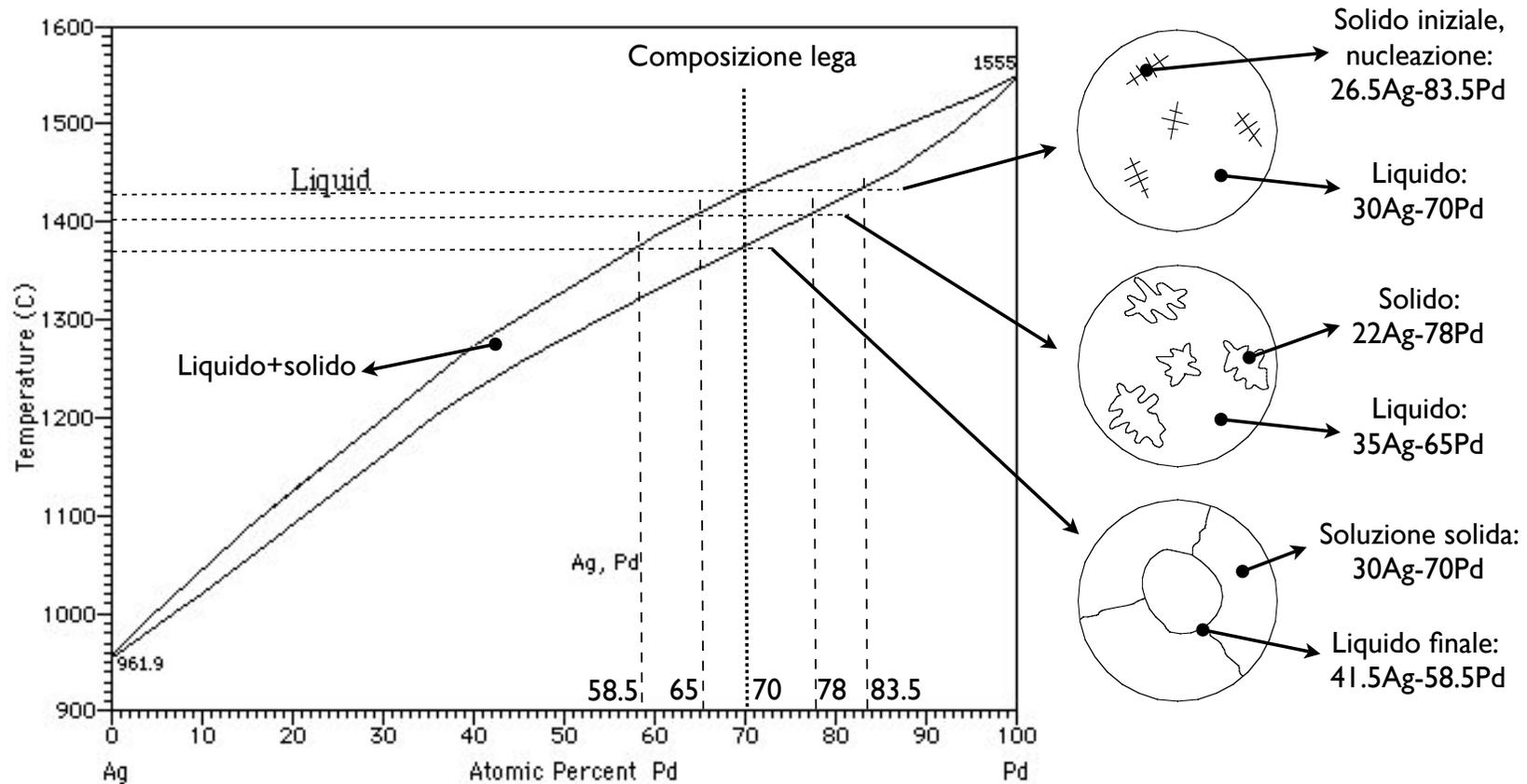


Leghe metalliche

- Con lega intendiamo un metallo non puro composto da due o più elementi (in lega).
- Possiamo avere:
 - Soluzione solide (lega omogenea):
 - Leghe sostituzionali (gli atomi occupano a caso gli stessi siti atomici, si sostituiscono)
 - Leghe interstiziali (gli atomi più grossi determinano il reticolo cristallino e i più piccoli occupano gli interstizi)
 - Composti intermetallici: con elementi anfoteri (Al) gli atomi differenti si ordinano in strutture stechiometriche simili a composti ionici. Molto dure e poco lavorabili.
 - Leghe bifasiche: sono composte da due fasi distinte con composizioni differenti. Spesso una fase costituisce la matrice e l'altra le inclusioni.

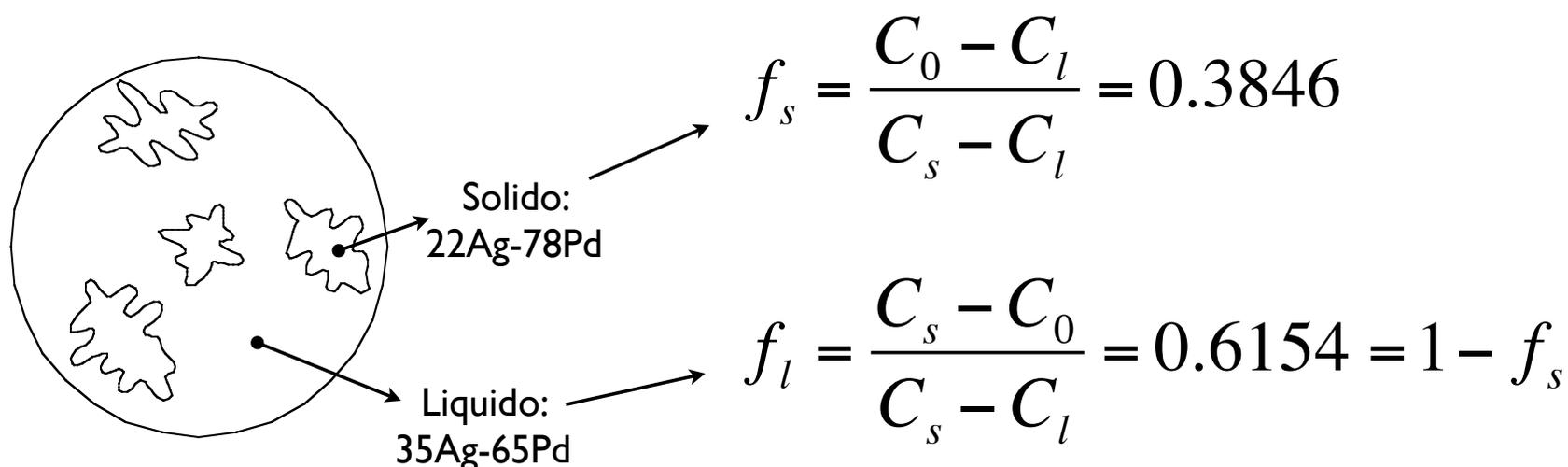
Diagrammi di fase

- Sono diagrammi di equilibrio, ossia rappresentano lo stato costante in un tempo infinito
- Esempio diagramma di fase binario Ag-Pd:



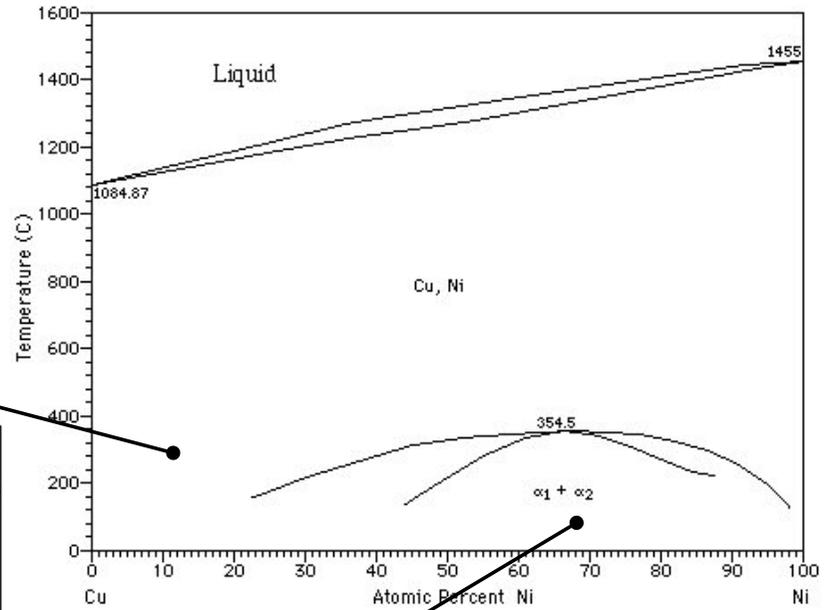
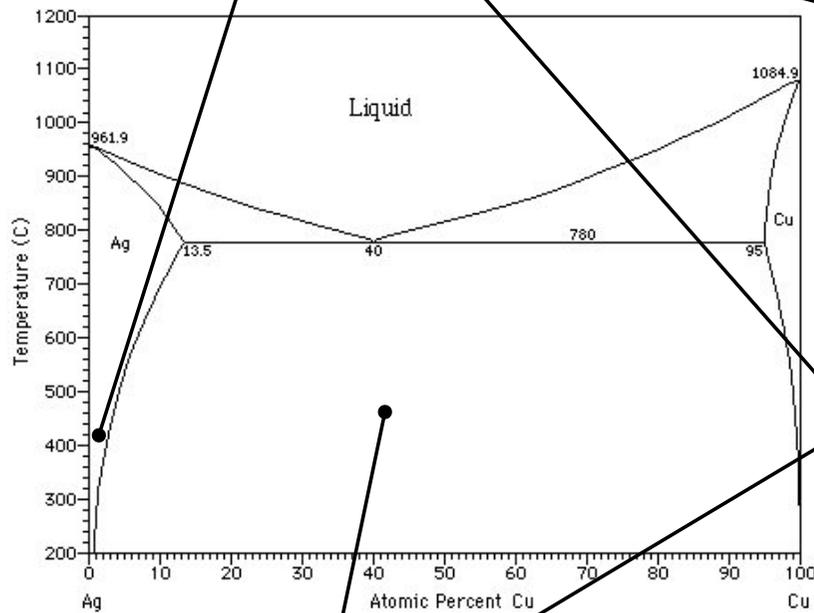
Regola della leva

- Per calcolare la frazione di due fasi dalla composizione media (iniziale) e dalle composizioni delle due fasi
- Consideriamo il caso intermedio precedente e chiamiamo C_0 la composizione (in Pd) della lega, C_s la composizione della fase solida e C_l quella del liquido:

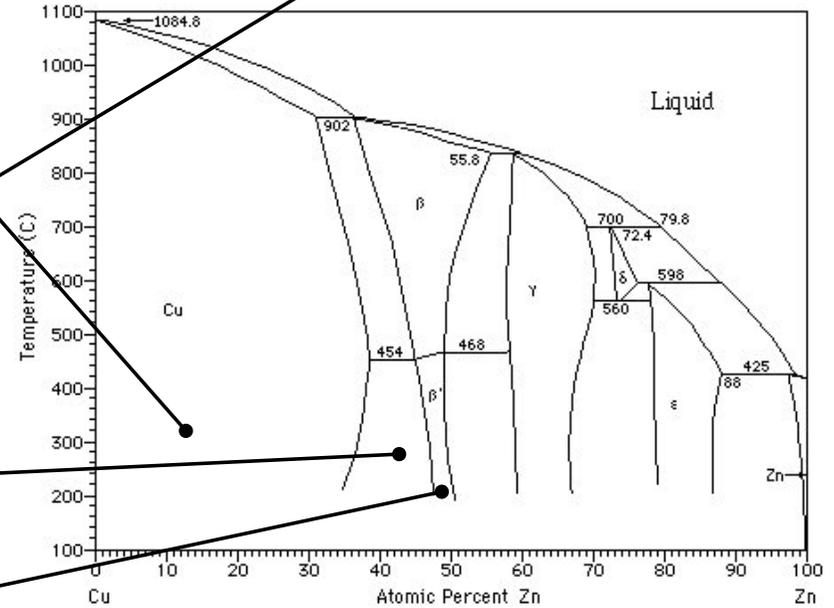


Altri esempi di diagrammi binari

Soluzione solida



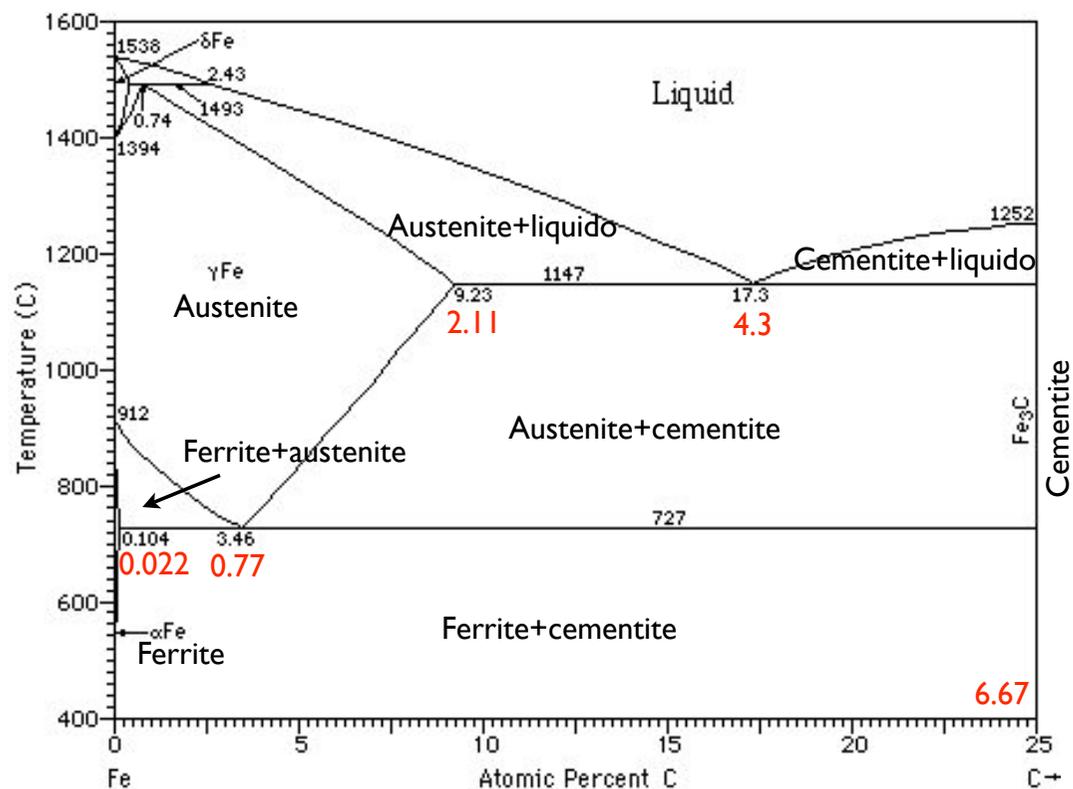
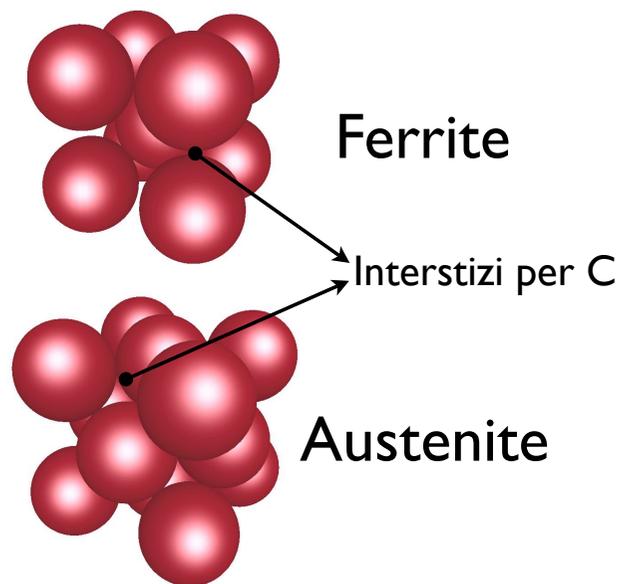
Lega bifasica



Intermetallico

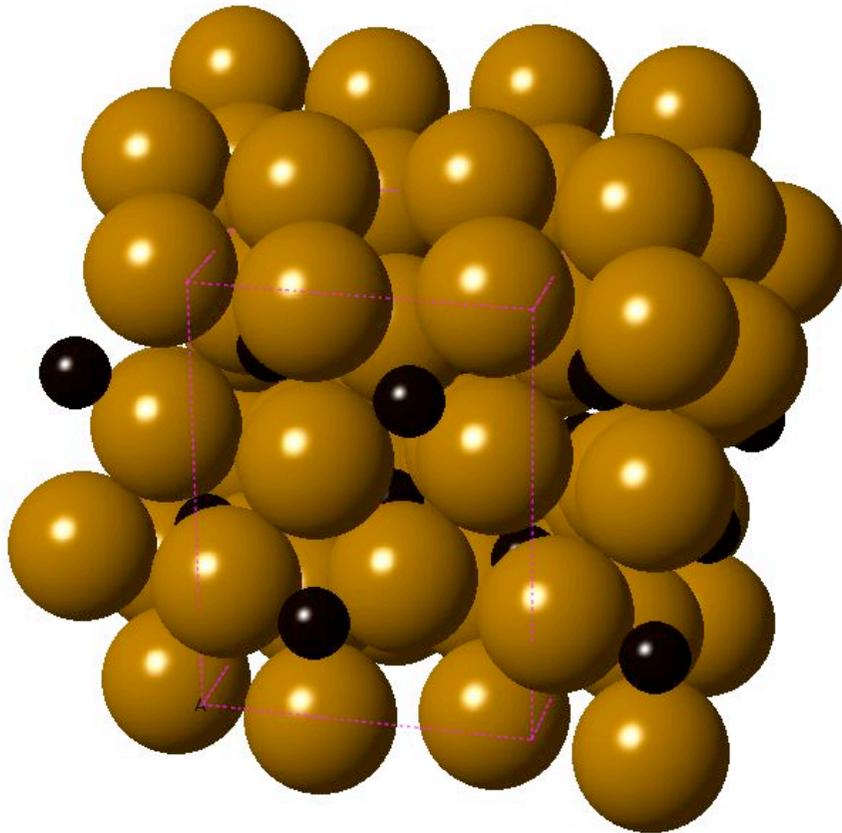
Il diagramma ferro-carbonio

- Fondamentale per comprendere acciai e ghise
- Ferro puro < 0.008%wt C
- Acciai < 2.11%wt C
- Ghise < 6.67%wt C

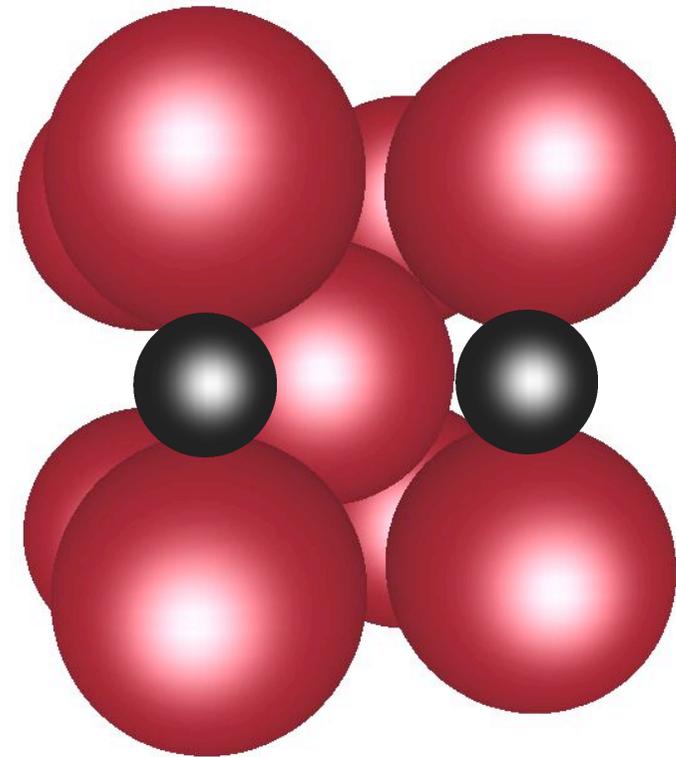


Altre fasi

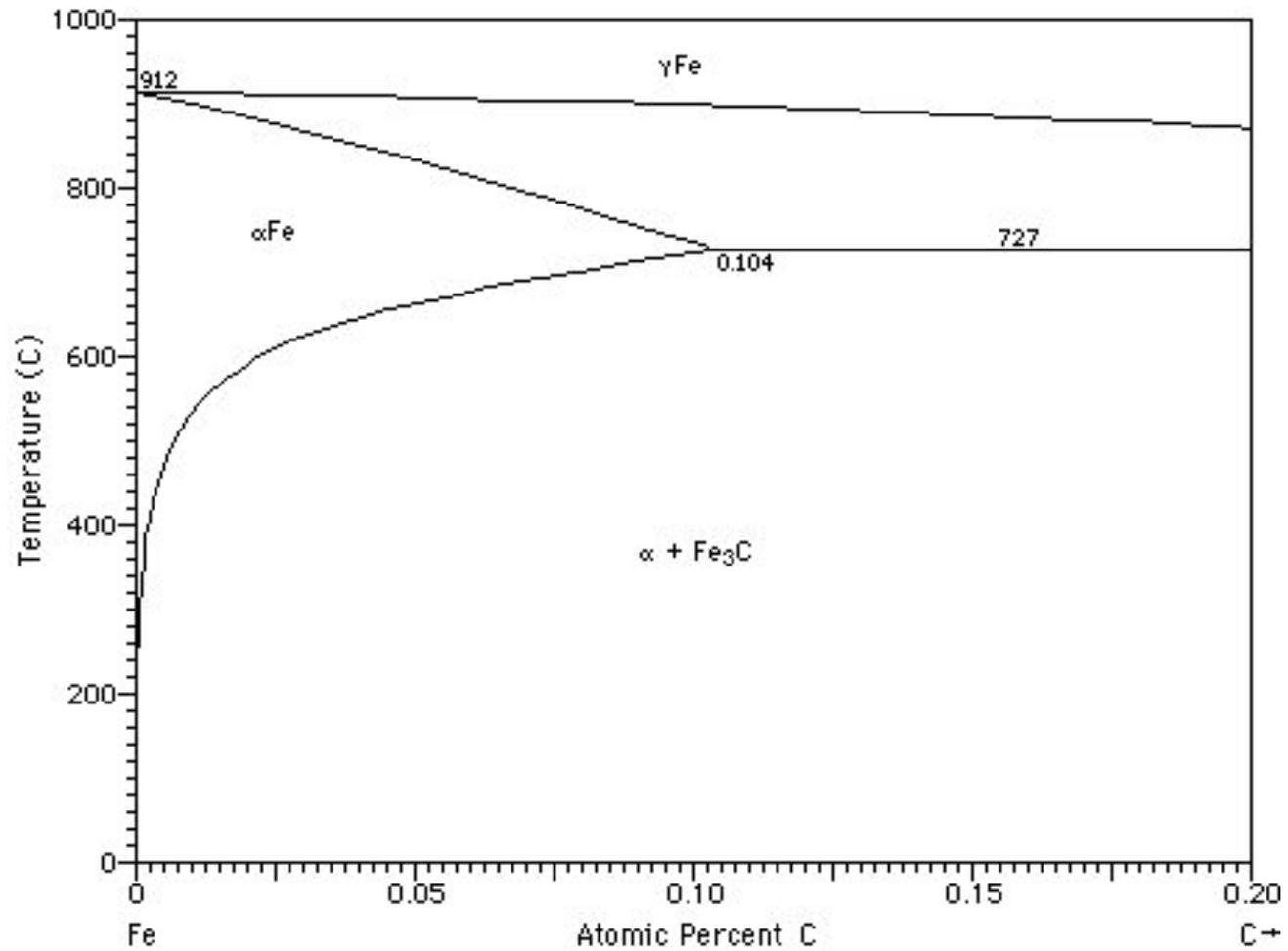
Cementite, Fe_3C



Martensite (da tempra)

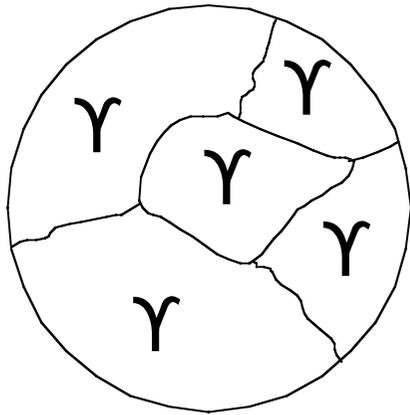


Porzione a basso C

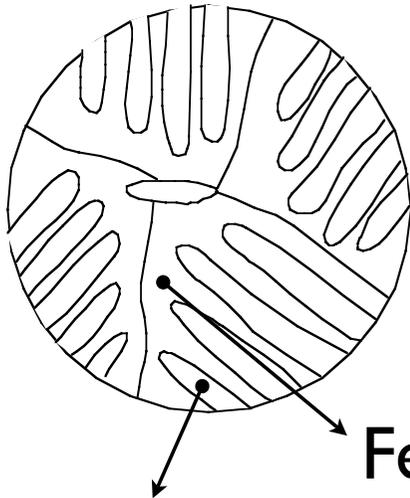


Microstruttura ed eutettoide (perlite)

Austenite



Perlite

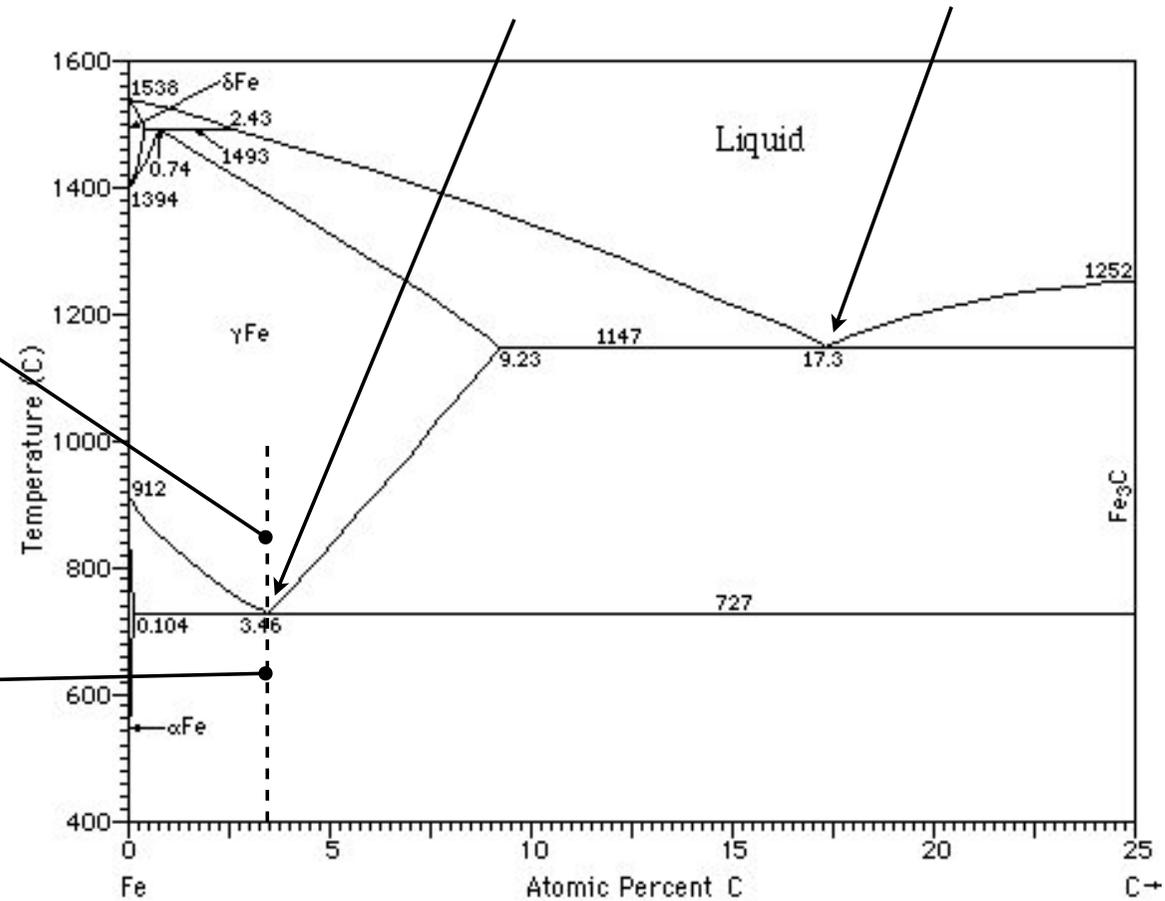


Ferrite

Cementite

Eutettoide

Eutettico



Ghise

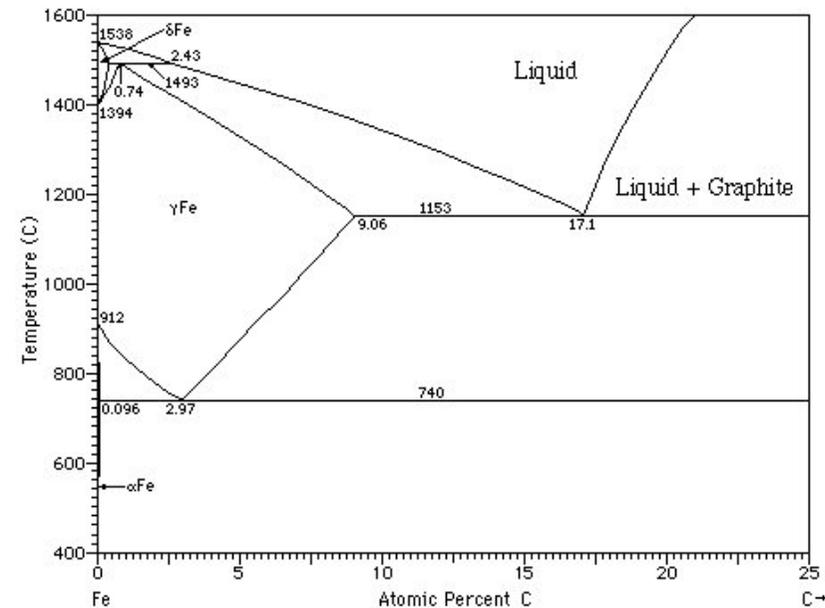
(da 2.11 a 4.5 wt% C)

Le ghise hanno alto contenuto in carbonio, di conseguenza bassa temperatura di fusione e bassa duttilità. Per cui il processo di formatura più conveniente è quello per colata

Tipi di ghise

- Ghisa grigia (da colata contiene grafite)
- Ghisa sferoidale (nodulare, basso S e O, danno grafite nodulare)
- Ghisa bianca (contiene carburi)
- Ghisa malleabile (da bianca, trattata per grafitizzare)

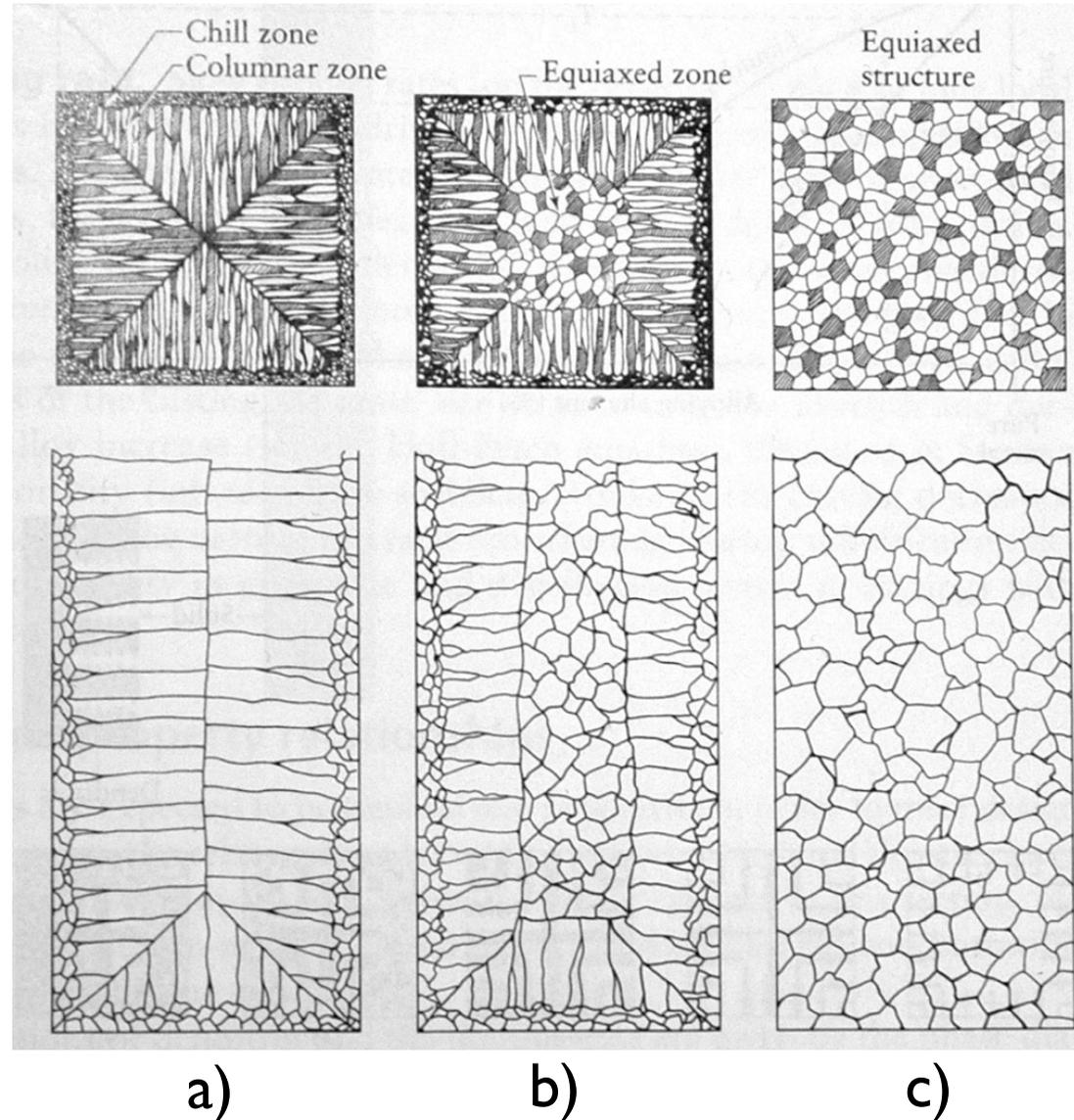
Fe-grafite



Strutture da colata

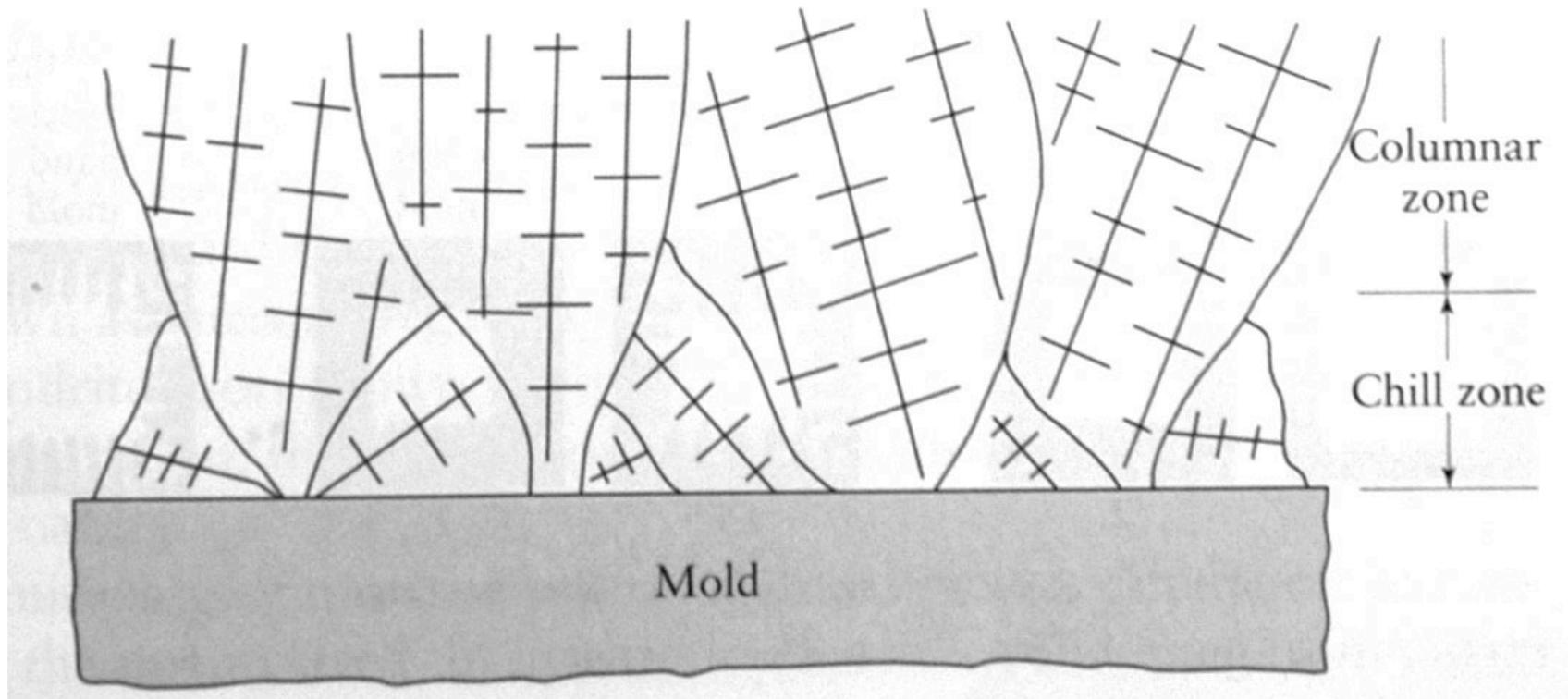
Raffreddamento in stampo quadrato:

- a) struttura colonnare da metallo puro
- b) struttura colonnare con parte centrale equiassiaca tipica di soluzioni solide
- c) struttura equiassiaca per nucleazione eterogenea

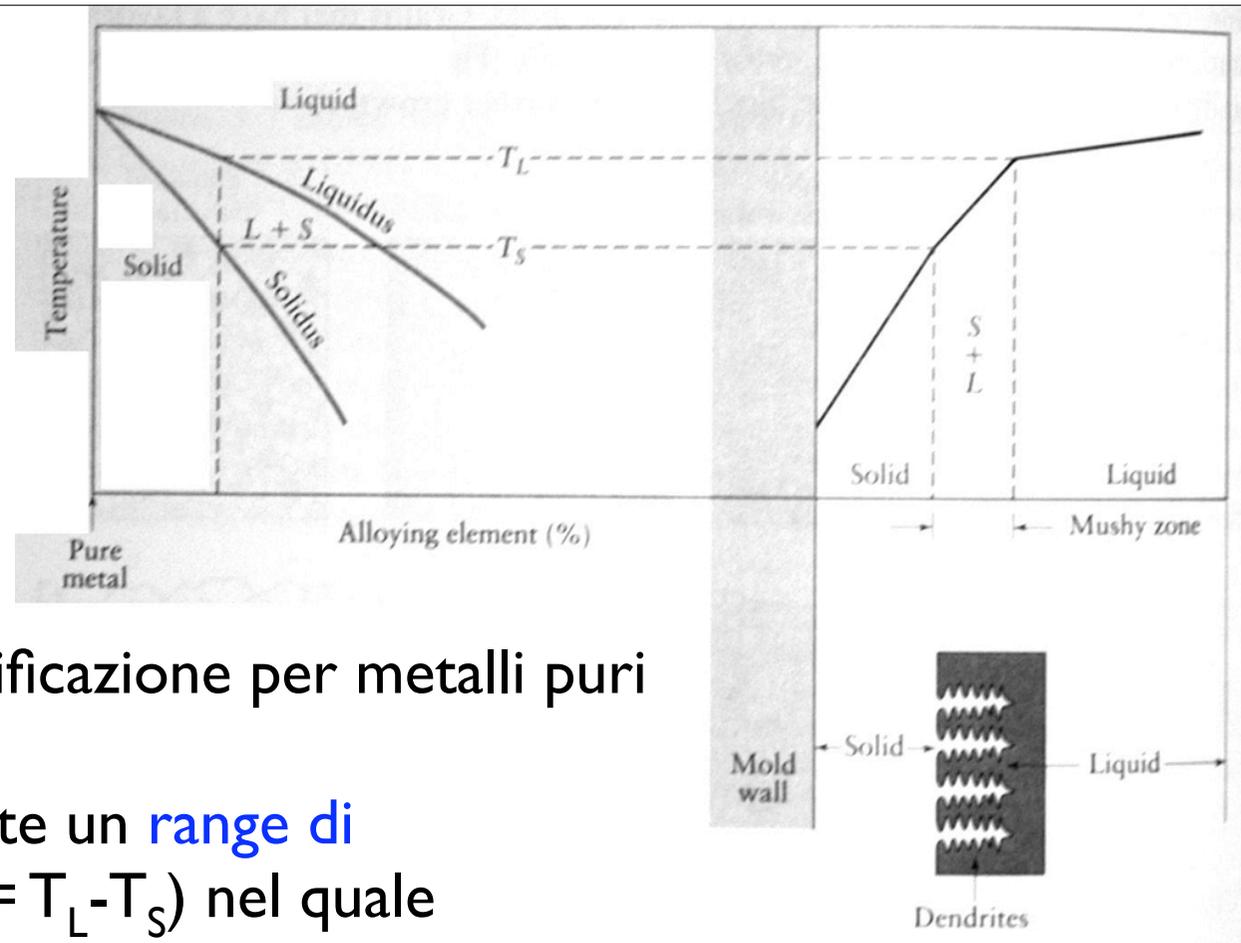


Struttura colonnare e tessitura

- Il calore viene sottratto dallo stampo e il gradiente di temperatura risulta normale alle pareti dello stampo
- I grani con orientazione favorevole al gradiente crescono velocemente e bloccano gli altri.



Solidificazione delle leghe

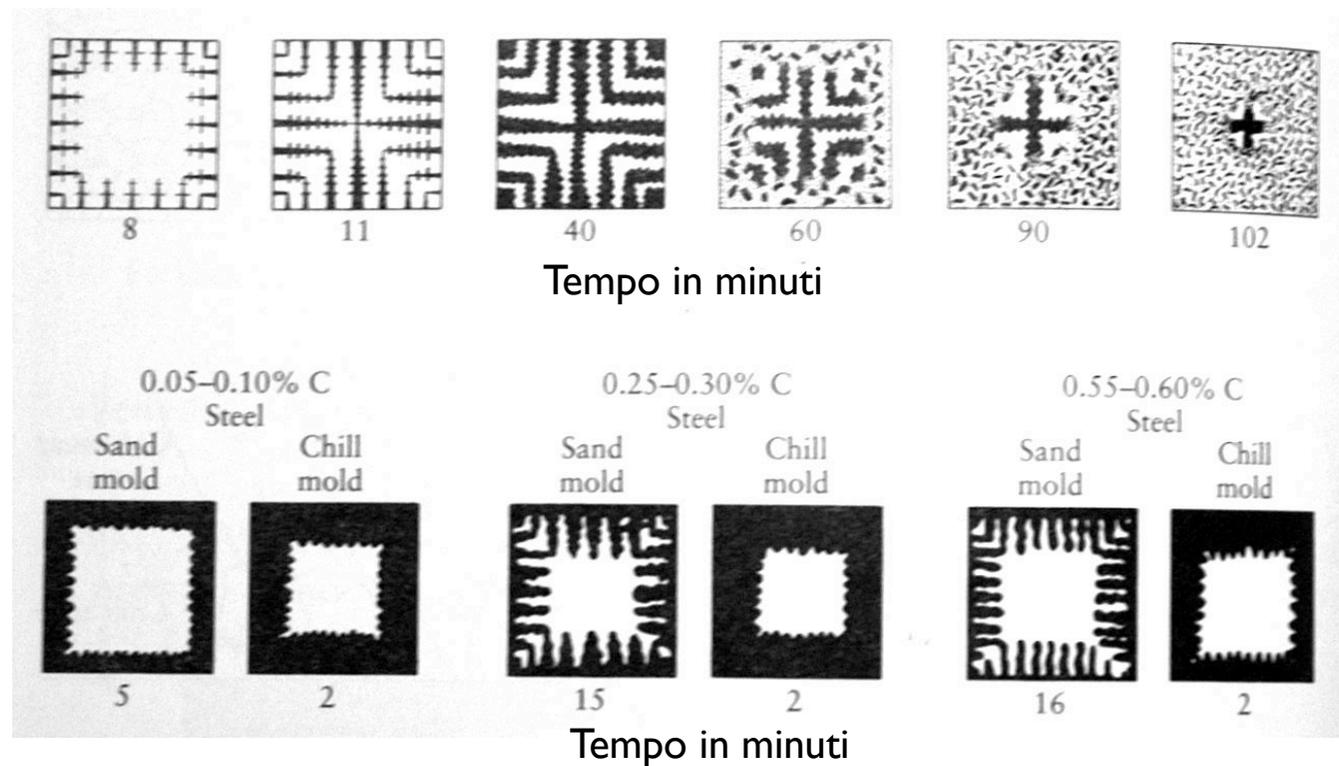


- Il fronte di solidificazione per metalli puri è uniforme
- Per le leghe esiste un **range di solidificazione** ($= T_L - T_S$) nel quale coesistono liquido e solido in equilibrio
- In tale zona si formano le dendriti
- Il range di solidificazione è stretto ($< 50^\circ$) per leghe ferrose e ampio per leghe Al e Mg

Figure di solidificazione

- Effetto della composizione (ghisa o acciai, contenuto in C) e del tipo di stampo (stampo caldo in sabbia o freddo in metallo) sulla formazione delle dendriti

Ghisa



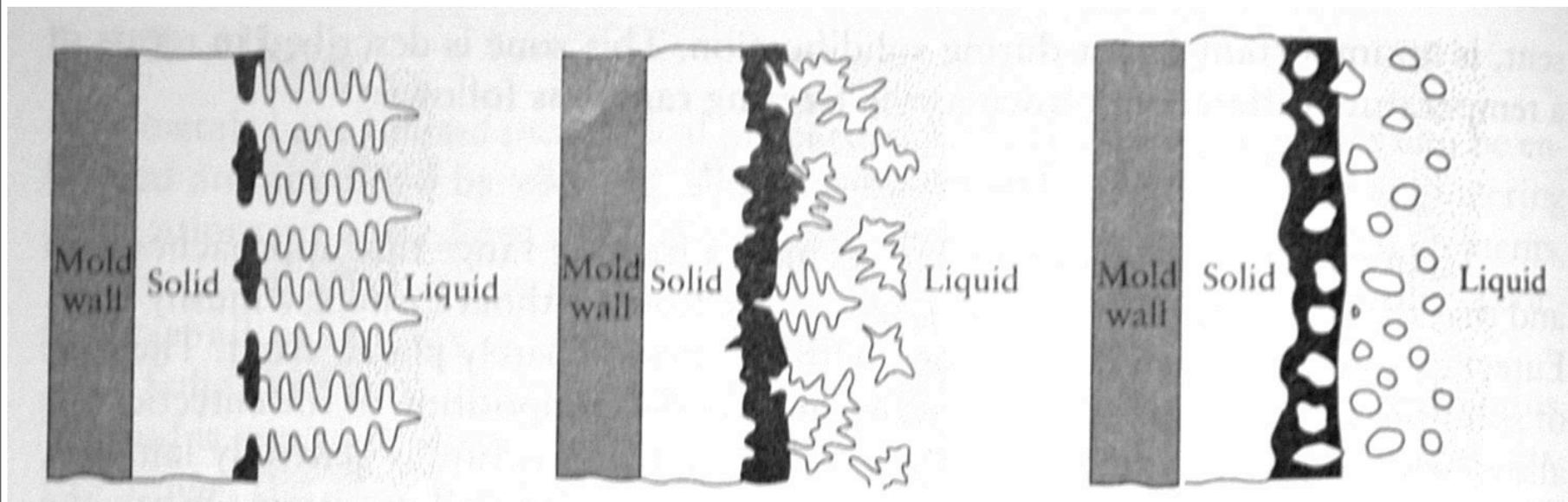
Acciai, colata in:
- sabbia
- stampo freddo

Velocità di solidificazione

- Velocità basse di raffreddamento ($\sim 10^2$ K/s) producono dendriti grosse con ampi spazi tra i rami delle dendriti
- Velocità alte di raffreddamento ($\sim 10^4$ K/s) producono strutture fini
- Velocità altissime (10^6 - 10^8 K/s) tendono a produrre leghe amorfe
- Con strutture più fini si ha:
 - maggiore resistenza e duttilità del pezzo
 - minore microporosità (vuoti da ritiro interdendritico)
 - cala la tendenza alla cricatura e rottura del pezzo

Fronte di solidificazione e segregazioni

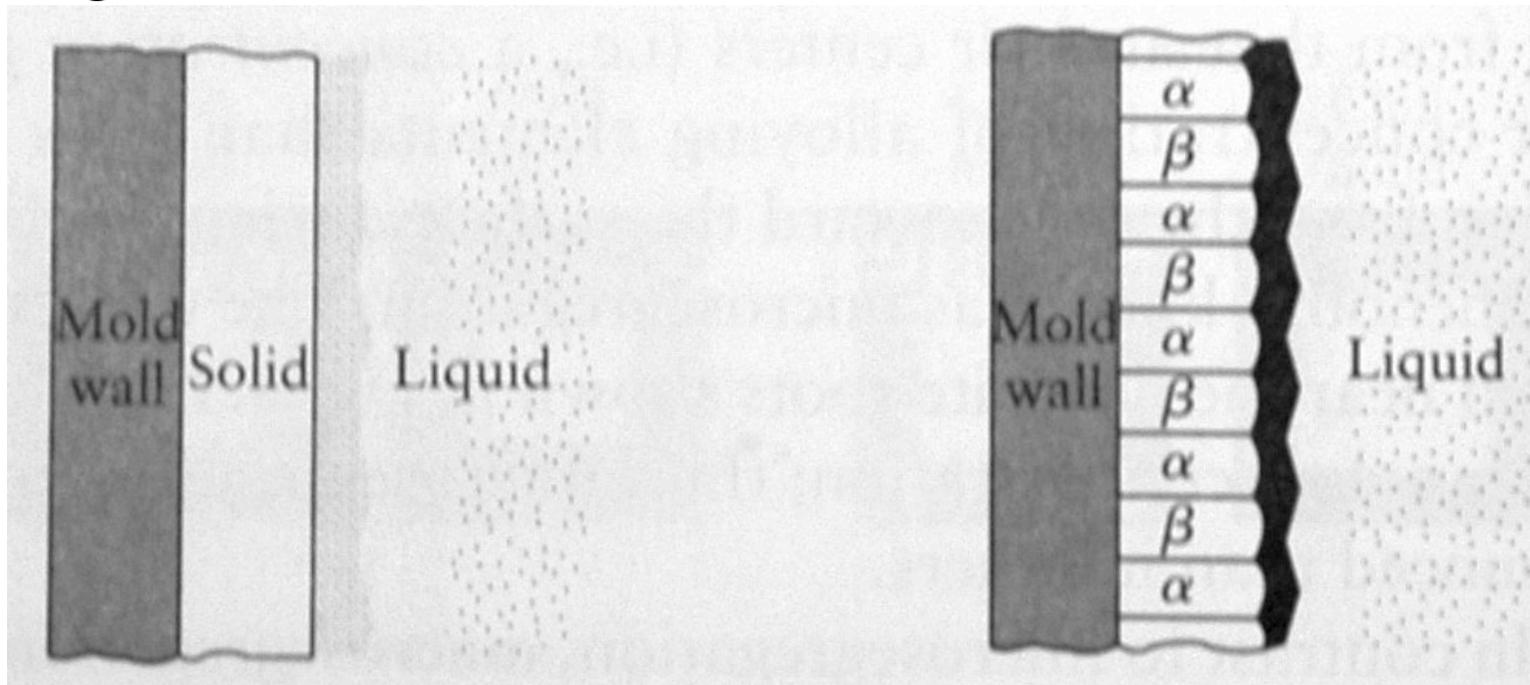
- Le proprietà del pezzo dipendono molto dalla microstruttura delle dendriti e dalla composizione
- Con le velocità di solidificazione normali non si dà il tempo al getto di omogenizzarsi in composizione
- Negli spazi interdendritici si ha concentrazione differente (microsegregazione)
- Rompendo le dendriti si aumenta l'omogenizzazione



Fronte di solidificazione e macrosegregazioni

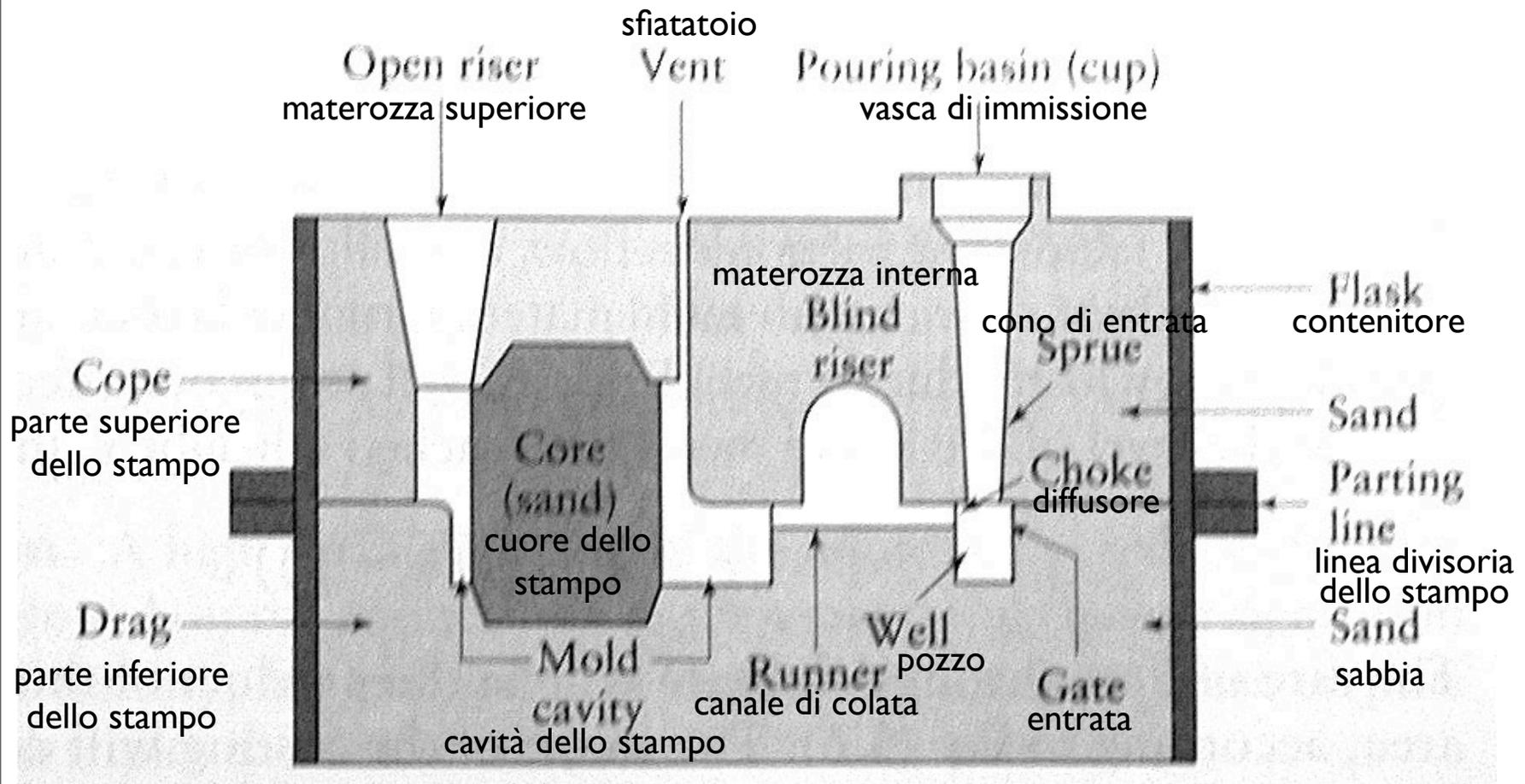
- Anche il fronte di solidificazione che avanza cambia la concentrazione tra le pareti dello stampo e la parte interna (cuore)
- Gli elementi bassofondenti vengono concentrati al cuore

Lega monofasica



Flussi fluidi e trasporto del calore

- Esempio: colata in stampo in sabbia; è progettato in modo da evitare più possibile turbolenze, intrappolamenti di gas e scorie



Teorema di Bernoulli e conservazione di massa

Teorema di Bernoulli: mette in relazione pressione, velocità e altezza del fluido:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{costante}$$

h = altezza, p = pressione, ρ = densità,

g = costante di gravità, v = velocità

Tra due punti (1 e 2) in uno stampo esiste la seguente relazione:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f$$

f = perdite per attrito

La conservazione di massa per un fluido incompressibile:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Q = quantità volumetrica del flusso, A = sezione del flusso

Esempio: dimensionamento cono d'ingresso

- Vogliamo fare in modo che la pressione nel punto 1 (più alto) e il punto 2 (più basso) del cono risulti uguale, $p_1 = p_2$
- Supponiamo non vi siano perdite per attrito, $f=0$
- Dalla legge di Bernoulli e conservazione di massa otteniamo:

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

Flussi laminari e turbolenze

- Per evitare bolle e difetti il flusso dovrebbe rimanere laminare, senza turbolenze
- La tendenza a formare turbolenze è data dal numero di Reynolds:

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta}$$

D = diametro del canale, η = viscosità del fluido

- $Re < 2000$ flusso laminare; nei gates si lavora tra 2000 e 20000 per Re; a tali valori si ha un misto di flusso laminare e turbolento
- Per minimizzare le turbolenze bisogna evitare il più possibile curve e ostacoli, nonché scorie nel fuso

Fluidità del metallo fuso

- La fluidità dipende da:
 - Viscosità (diminuisce con la temperatura)
 - Tensione superficiale (alta tensione superficiale riduce la fluidità)
 - Inclusioni non fuse
 - Caratteristiche di solidificazione; ampio range di solidificazione corrisponde a minore fluidità
- Le seguenti caratteristiche influenzano anche il flusso e le caratteristiche termiche del sistema:
 - Disegno dello stampo
 - Materiale dello stampo (conduttività termica) e rugosità dello stampo; influenzano il flusso di calore e lo scorrimento del fluido
 - Grado di surriscaldamento sopra la T di fusione
 - Velocità di immissione del fluido; bassa velocità=bassa fluidità
 - Trasporto di calore

Test per la fluidità

- Per determinare la fluidità di un metallo fuso viene condotto un test nel quale il fluido viene fatto scorrere lungo un canale a temperatura ambiente. Si misura la distanza che il flusso riesce a percorrere prima di solidificare e fermarsi.
- In genere si usa il termine colabilità (castability) per descrivere la facilità con cui un metallo può venir utilizzato in colate in stampi ed ottenere dei pezzi di buona qualità. Tale termine generale include anche la fluidità ma non solo.

Trasporto del calore

- Il trasporto del calore durante il processo di colata e raffreddamento è molto importante e dipende da diversi fattori, molti già citati. Spesso si usano delle simulazioni al calcolatore ed metodi FEM (Finite Element Method) per analizzare il trasporto del calore.
- Ad esempio se si vogliono ottenere delle sezioni sottili per colata, il trasporto di calore sarà molto rapido attraverso le ampie superfici dello stampo. Bisogna aumentare la velocità del flusso, ma questo tende ad aumentare la turbolenza. Quindi bisogna trovare il giusto compromesso.

Tempo di solidificazione

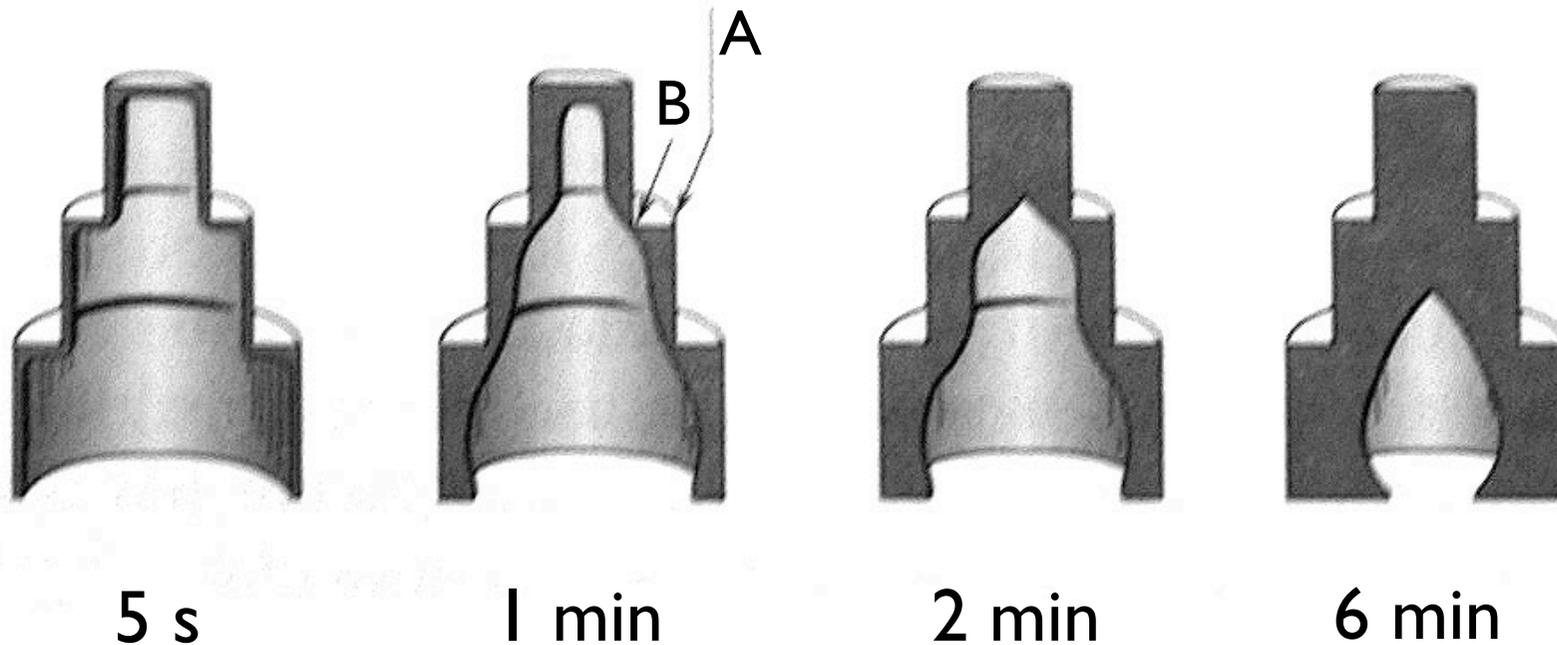
- La solidificazione comincia dalle pareti dello stampo con un sottile velo.
- Per pareti piane lo spessore della parete solidificata è proporzionale alla radice quadrata del tempo. Per cui si può esprimere il tempo di solidificazione come funzione del volume della colata tramite la **legge di Chvorinov**:

$$\text{tempo solidificazione} = C \left(\frac{\text{volume}}{\text{area superficie}} \right)^2$$

C è una costante che dipende dal materiale dello stampo, dalle proprietà del metallo e dalla temperatura

Solidificazione, esempio

- Se dopo aver messo il fuso in uno stampo aperto, lo ribaltiamo e facciamo uscire il metallo non solidificato, possiamo osservare come procede la solidificazione.
- Nel caso seguente si vede come il flusso di calore è maggiore sugli angoli esterni (A) rispetto agli interni (B)



Ritiro del fuso

- Il metallo si contrae sia durante la solidificazione che nel successivo raffreddamento a temperatura ambiente
- Il ritiro oltre a cambiare dimensionalmente il pezzo (anche in maniera non omogenea) può causare cricche e fessure
- Il ritiro totale del metallo è dato da:
 - ritiro del fluido prima di solidificare (contrazione termica)
 - contrazione del metallo durante la solidificazione (differente densità tra liquido e solido)
 - ritiro del metallo durante il raffreddamento a temperatura ambiente (contrazione termica)
- La maggior parte del ritiro avviene nella solidificazione. Alcune leghe (ghisa grigia) possono anche espandersi per la formazione di grafite a densità inferiore

Ritiro o espansione per solidificazione

materiale	% contrazione
Aluminio	7.1
Zinco	6.5
Al,4.5%Cu	6.3
Oro	5.5
Ghisa bianca	4-5.5
Rame	4.9
Ottone (70-30)	4.5
Magnesio	4.2
Cu,10%Al	4
Acciai	2.5-4
Al,12%Si	3.8
Piombo	3.2

materiale	% espansione
Bismuto	3.3
Silicio	2.9
Ghisa grigia	2.5

Difetti da colata

- Sporgenze metalliche (bave o rugosità)
- Cavità, da ritiro o da soffiature....
- Discontinuità (cricche e fessure)
- Difetti di superficie (pieghe, sabbia rimasta attaccata, ossidi...)
- Colata incompleta per mancanza di metallo d'apporto o solidificazione prematura
- Dimensionamento incorretto per ritiro eccessivo o montaggio errato dello stampo, ritiro disomogeneo....
- Inclusioni, specialmente non metalliche sono pericolose
- Porosità

Porosità

- La porosità è dovuta a ritiro o gas intrappolato
- La porosità è negativa per tutte le proprietà meccaniche e anche per la finitura superficiale
- Spesso il metallo solidifica prima nelle sezioni più sottili e quindi fatica a riempire bene le regioni più spesse (il flusso è costante) che non solidificano e il flusso scorre via maggiormente. Nelle regioni più spesse al centro si crea porosità.
- Microporosità si forma poi nelle regioni interdendritiche
- Si può eliminare con sorgenti fredde (vedi seguito)
- Si riduce con stampi ad alta conducibilità termica
- Si elimina con Hot Isostatic Pressing (HIP, costoso)
- I gas maggiormente solubili nel liquido vengono espulsi nel solido creando bolle. Si riducono con fusioni sotto vuoto o in gas inerte oppure aggiungendo deossidanti (Al o Si)

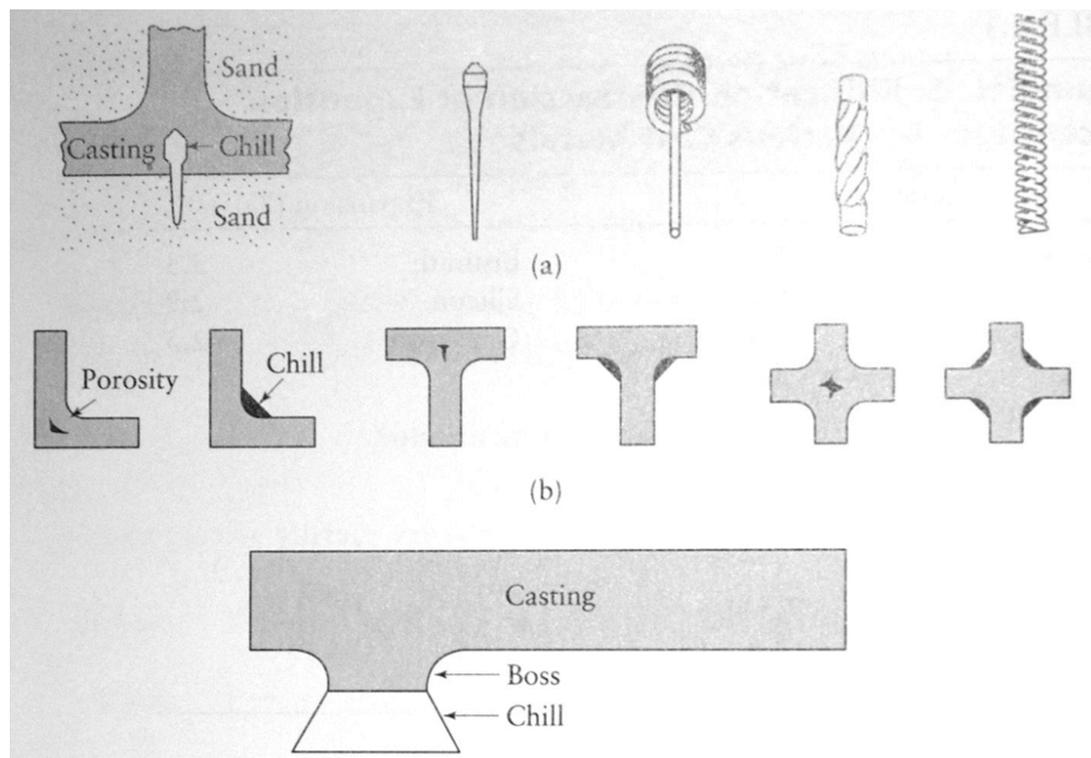
Porosità: dito freddo per ridurla

- Si usano delle sorgenti “fredde” (dita fredde) per aumentare la velocità di raffreddamento in alcune zone critiche e ridurre la porosità

(a) interni, stesso materiale dello stampo

(b) esterni, metallici

(c) per grossi volumi



Pratica della fusione e forni

- La fusione è molto importante poichè determina la qualità della colata
- I forni vengono caricati con il materiale base: metallo più elementi in lega, si aggiungono degli addensanti di scoria per rimuovere impurezze e gas disciolti. La scoria risultante è usata in alcuni casi come barriera all'ambiente (galleggia sopra il fuso)
- Per gli acciai la scoria è composta principalmente da CaO , SiO_2 , MnO e FeO
- Nella carica principale si aggiunge anche il materiale di riciclo

Forni di fusione

- Forni ad arco elettrico: hanno alta velocità di produzione e contaminano poco il fuso, molto usate nelle fonderie
- Forni ad induzione: molto usati in piccole fonderie, adatti per fusioni a composizioni controllate (acciai e leghe speciali). Il crogiolo è circondato (interamente o in parte) da una spirale in rame raffreddata nella quale passa una corrente ad alta frequenza. Il campo elettromagnetico molto forte funziona anche da agitatore del fuso omogenizzando la composizione.
- Forni a crogiolo: molto comuni nel passato il crogiolo viene riscaldato con vari metodi e può essere movimentato.
- Forni a pozzo: sono verticali rivestiti in refrattario e vengono caricati dall'alto con strati alternati di metallo, coke e calcare. Operano in continuo ma sono molto costosi.
- Fusione in levitazione: un campo magnetico tiene confinato il metallo fuso. Riducono al minimo le contaminazioni. Si ottengono getti uniformi, liberi da gas e inclusioni a grana fine.

Fonderie e automazione

- Le fonderie svolgono la maggior parte dei processi di fusione e colata.
- Le due attività di lavoro principali sono:
 - preparazione dei pattern e stampi; per tale compito si fa molto uso di CAD e prototipazione rapida per minimizzare gli errori; tale processo è solo in parte automatizzato,
 - fusione e controllo della composizione.
- Il resto delle operazioni, ossia la colata in stampi, apertura degli stessi, pulizia, trattamenti termici e ispezioni sono completamente automatizzate.
- L'ambiente della fonderia è poco salubre e pericoloso, per cui l'automazione spinta è una necessità.

Leghe da getto ferrose

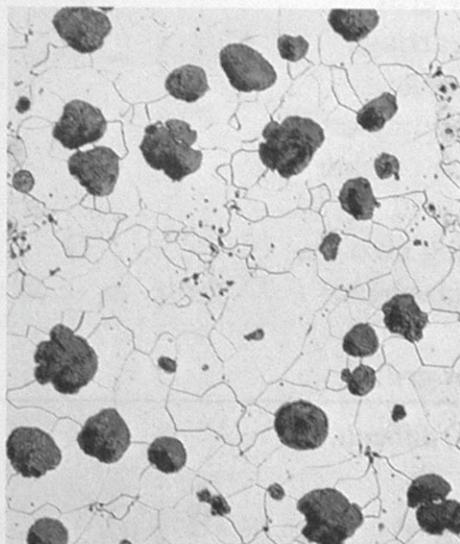
- Ghisa grigia: molto fragile e poco lavorabile, si forma per colata in getti; usata molto come basamento di macchine utensili o macchine in genere per le proprietà di smorzamento vibrazioni (tramite dissipazione per attrito interno)
- Ghisa sferoidale: per applicazioni dove si richiede maggior resistenza a shock
- Ghisa bianca: molto più dura, si usa dove ci sono problemi di usura (piani di lavoro in macchine utensili, rulli per laminatoi...)
- Ghisa malleabile: più duttile e tenace si usa tipicamente per rotaie
- Acciai da fusione: hanno un'alta T di fusione e sono difficili da colare in getti; in genere hanno proprietà molto più isotrope dei pezzi ottenuti per deformazione meccanica o altre lavorazioni; si possono saldare, ma vanno poi trattati termicamente per ripristinare la microstruttura
- Acciai inox da fusione: come per gli acciai al carbonio possono poi venir saldati per ottenere pezzi più complessi; hanno un range di solidificazione molto ampio che non facilita la colata in stampi

Microstruttura ghise

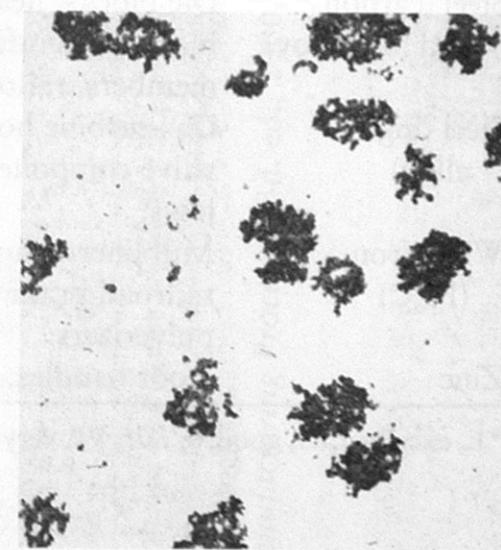
Ghisa grigia



Ghisa sferoidale



Ghisa malleabile



Leghe da getto non ferrose

- Leghe d'alluminio: sono leghe leggere utilizzate molto in aeronautica e altre applicazioni meccaniche. E' in crescita l'uso di leghe d'alluminio da fusione per blocchi motore (precedentemente fatti in ghisa per smorzare le vibrazioni)
- Leghe magnesio: leghe leggere con buone caratteristiche di resistenza alla corrosione
- Leghe rame: leghe dalla buona conducibilità elettrica e termica, buone per l'usura e quindi usate molto in cuscinetti e guarnizioni
- Leghe zinco: buona fluidità, si usano molto per colate in stampi
- Leghe per alta temperatura: sono in genere molto dure e poco lavorabili, per cui i processi di colata sono molto usati per la loro formatura in pezzi