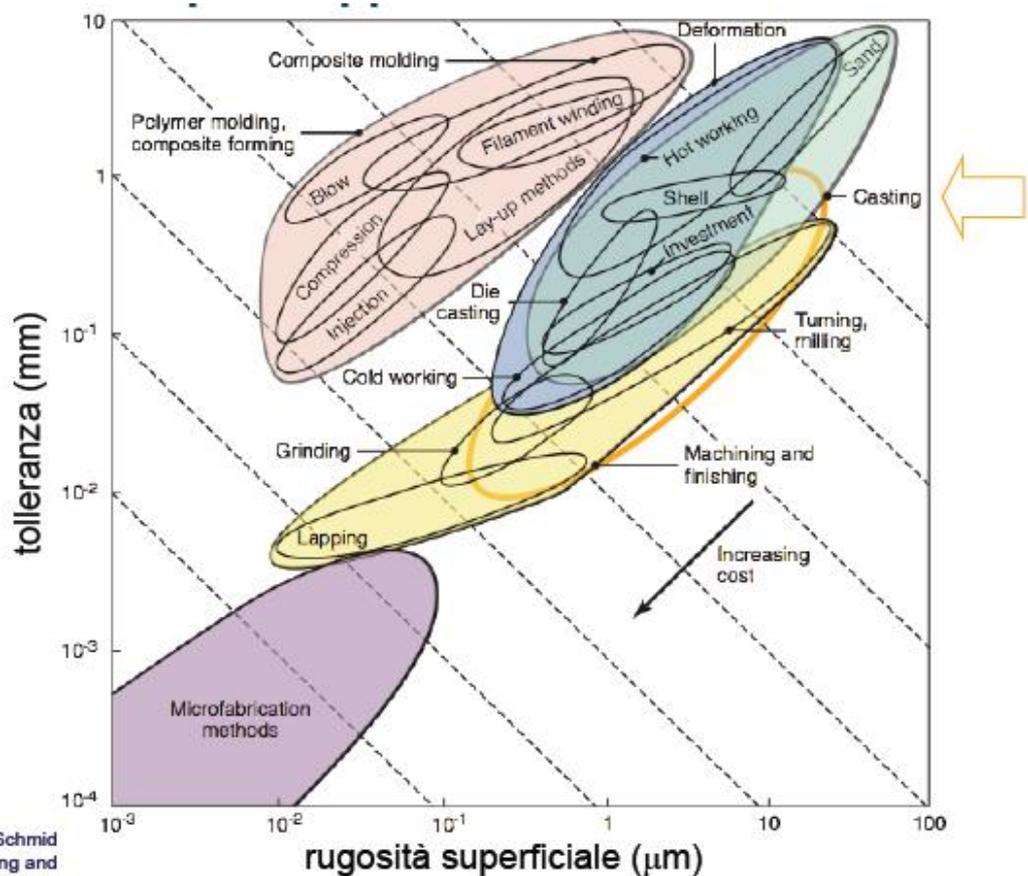


FONDAMENTI DELLA COLATA DEI METALLI

Introduzione

La colata è un processo in cui il metallo fuso fluisce sotto l'azione della forza di gravità o di altra forza (ad esempio in pressione) in una forma dove solidifica e prende la geometria della cavità dello stampo stesso. Il componente realizzato mediante colata si indica con il termine grezzo o getto. Per effettuare tale processo tecnologico occorre dunque portare il metallo ad una temperatura maggiore di quella di fusione così da poterlo versare nella forma.

Il grafico presente di seguito rappresenta la finestra tecnologica dei vari processi: in questo caso i processi di fonderia sono rappresentati dall'area verde indicata con la parola sand. Tale lavorazione permette di rispettare tolleranze ampie (poco precisi) e avere rugosità superficiali alte quindi finiture superficiali basse.



Caratteristiche generali dei processi di colata

Analizziamo ora alcune caratteristiche generali dei processi di colata:

- La colata può essere utilizzata per creare forme complesse sia esterne che interne. È importante tenere presente che la colata permette anche di creare dei pezzi aventi delle cavità. Non si avranno così solo pezzi completamente pieni. La formazione di tale cavità è resa possibile grazie all'uso di anime, cioè elementi in sabbia o metallo che permettono di realizzare aree cave all'interno del pezzo stesso. È inoltre importante sapere che questa lavorazione tecnologica permette di realizzare forme estremamente complesse.
- Alcuni processi di colata sono in grado di produrre pezzi *net shape* cioè che non necessitano di lavorazioni successive per ottenere la forma e le dimensioni richieste.
- Alcuni processi di colata sono *near net shape* per cui sono necessarie alcune lavorazioni aggiuntive, solitamente per asportazione di truciolo, per ottenere le accuratèzze, le precisioni e la finitura superficiale richiesta.

- La colata può essere utilizzata per produrre pezzi di grandi dimensioni. I getti possono raggiungere un peso superiore alle 100 tonnellate. La fattibilità tecnica è garantita anche se il costo aumenta con l'aumentare della dimensione
- Il processo di colata può essere eseguito su un qualsiasi metallo che può essere trasformato in stato liquido. È dunque un processo molto flessibile.
- Alcuni metodi di colata sono molto adatti alla produzione di massa e viceversa alcuni metodi di colata sono adatti alla produzione di prodotti customizzati

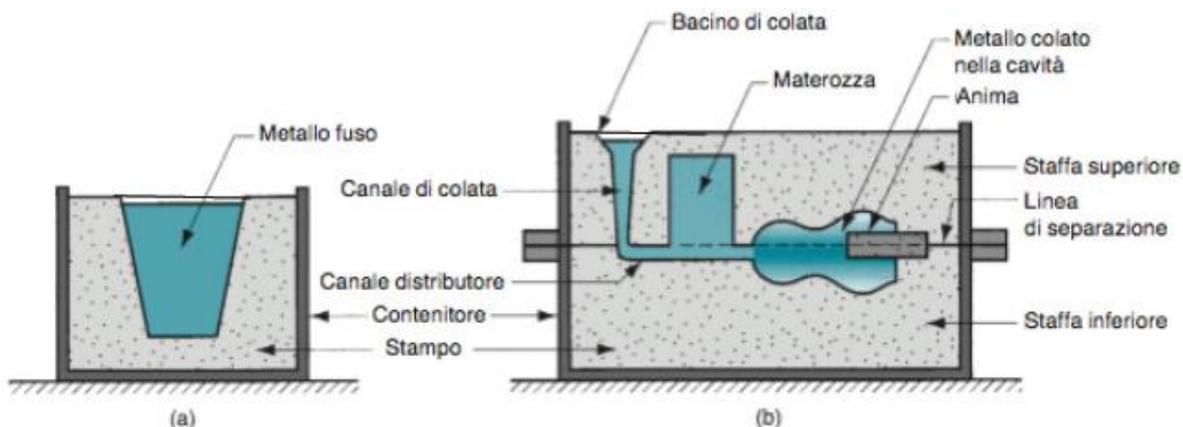
Criticità e limiti tecnologici della colata

Analizziamo ora alcuni aspetti critici della colata:

- Proprietà meccanica del getto = le proprietà meccaniche non sono omogenee e quindi in alcune parti si avranno del pezzo si tenderà ad avere delle proprietà differenti dal resto del componente. Questo fatto è la diretta conseguenza della dinamica di raffreddamento: in generale è possibile affermare che il cuore del pezzo presenterà le proprietà meccaniche peggiori.
- Tensione termiche di ritiro e residue = tale elemento genera dei difetti non facilmente visibili che prendono il nome di cricche interne che porteranno a rottura il pezzo. Esistono però delle tecniche di ispezione (controlli non distruttivi) che permettono di valutare la presenza o meno di cricche.
- Porosità dei getti = dipende da tanti fattori come il tipo di gas che si genera quando il materiale viene colato. È un aspetto negativo poiché influenza le proprietà meccaniche del pezzo.
- Scarsa finitura superficiale
- Sicurezza dell'operatore durante la lavorazione dei metalli ad alte temperature
- Problematiche ambientali ed energetiche = per effettuare la colata occorre infatti molta energia che viene prodotta tramite forni. I processi di fonderia sono definiti energivori poiché necessitano di una grande quantità di energia. Altro problema da tener presente riguarda le emissioni.

La forma

La forma comprende una cavità la cui geometria determina la geometria che avrà il pezzo finale. Nel caso di una forma aperta (fig. a) il metallo liquido viene versato semplicemente fino a riempire la cavità. In una forma chiusa (fig. b) viene realizzato un percorso detto sistema di colata per consentire al metallo fuso di fluire dall'esterno della forma verso la cavità. Ipotizzando di avere una forma rettangolare chiamiamo il piano di separazione tra le due porzioni di forma piano di separazione delle staffe. Le due porzioni invece prendono il nome di semistaffe. Tale configurazione risulterà utile nell'analisi ingegneristica della colata e dunque nel dimensionamento del canale di colata.



Esistono due tipi di forme:

- Transitoria = in questo caso la forma in cui il metallo fuso si solidifica deve essere distrutta per rimuovere il pezzo. Nel caso di forma transitoria occorre per prima cosa creare la forma

utilizzando degli opportuni modelli. Poi si realizza la colata e si estrae il pezzo mediante rottura della forma. Per il successivo pezzo occorrerà effettuare il procedimento da capo. Esempi di colata in forma transitoria sono: microfusione, colata in sabbia, colata in getto o ceramica.

- Permanente = in questo caso la forma, o stampo, può essere utilizzata più volte per produrre diversi pezzi. Per estrarre il pezzo occorrerà un'apertura nella forma che potrà dunque essere utilizzata per il successivo pezzo. Se il vantaggio di questo secondo caso è la diminuzione del tempo di processo, uno svantaggio non irrilevante è il costo: realizzare uno stampo è più costoso rispetto al realizzare una forma in sabbia che poi viene distrutta. Esempi di colata in forma permanente sono: colata in stampo metallico, colata centrifuga e pressofusione.

La scelta tra questi due tipi di forme dipenderà da caso a caso. La forma permanente viene generalmente utilizzata quando si è in presenza di ampi volumi di produzione; il volume di produzione non è però l'unico criterio di scelta tra le due forme che dipenderà anche dalle proprietà meccaniche che si desidera ottenere.

Il processo di colata si distingue in due fasi:

1. Fusione del metallo e colata
2. Solidificazione e raffreddamento

Processo di colata: fase 1a – fusione

In questa fase è importante che la temperatura del metallo sia superiore alla sua temperatura di fusione e inoltre occorre che sia sufficientemente elevata così da evitare che il pezzo solidifichi non appena viene colato. In generale quindi il metallo viene portato ad una temperatura nota come temperatura di colata che risulta essere maggiore di quella di fusione così, appunto, da evitare una solidificazione troppo repentina e riuscire dunque a riempire interamente la cavità prima che il materiale solidifichi. L'energia termica richiesta per riscaldare il metallo ad una temperatura di fusione sufficiente sarà la somma dei seguenti termini:

- Il calore necessario ad aumentare la temperatura fino al punto di fusione
- Il calore latente di fusione per convertire il metallo da solido a liquido
- Il calore per aumentare la temperatura del metallo fuso affinché possa essere versato

In termini matematici avremo la somma di tre contributi diversi:

$$H = \rho V [C_s(T_m - T_0) + H_f + C_l(T_p - T_m)]$$

Dove:

H	calore totale [J]
ρ	densità del metallo [g/cm ³]
V	volume del metallo da riscaldare [cm ³]
C_s	calore specifico del metallo solido [J/g°C]
T_m	temperatura di fusione del metallo [°C]
T_0	temperatura iniziale [°C]
H_f	calore latente di fusione [J/g]
C_l	calore specifico del metallo liquido [J/g°C]
T_p	temperatura di colata [°C]

Per applicare tale modello è necessario che il calore specifico non vari al variare della temperatura, che la temperatura di fusione sia unica (tale modello non è dunque applicabile alle leghe) e infine che non ci sia scambio di calore con l'ambiente durante il riscaldamento.

L'obiettivo della colata sarà dunque far sì che il metallo raggiunga tutte le regioni della forma prima di solidificarsi. I fattori che possono influenzare ciò sono principalmente due: temperatura di colata T_p e velocità di colata v . Se aumenta la temperatura di colata allora anche il tempo prima della solidificazione aumenterà; ciò comporta un aumento del costo energetico. Inoltre se la velocità di colata aumenta si riduce il rischio che il materiale solidifichi prima di riempire la forma, ma si possono verificare delle turbolenze e delle conseguenti erosioni della forma. È

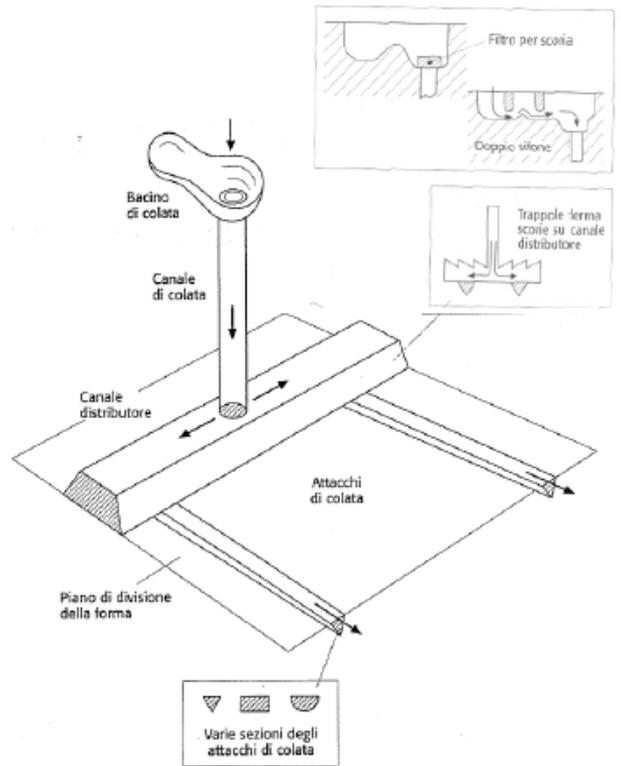
dunque necessario bilanciare questi effetti che si contrastano così da trovare il giusto equilibrio: sia produttivo che economico.

Processo di colata: fase 1b – colata

Quando si parla di sistema di colata si intende l’insieme delle seguenti parti:

- Bacino di colata = prima zona che il fuso incontra. È una coppa in cui viene versato il metallo fuso. Contiene dei filtri e dei dispositivi per evitare che le eventuali impurità metalliche entrino nella forma stessa. Ha tale geometria per evitare le turbolenze e quindi la possibile formazione di gas: nella coppa infatti è come se il metallo fuso ristagnasse evitando la presenza di bolle d’aria o altri gas.
- Canale di colata = canale verticale all'interno del quale il metallo cade per gravità acquistando velocità grazie alla trasformazione di energia potenziale in energia cinetica. Per analizzare tale trasformazione energetica occorrerà il teorema di Bernoulli.
- Canale distributore = detto anche collettore, è il canale orizzontale che consente al metallo fuso di raggiungere i diversi punti della forma
- Attacchi di colata = portano il materiale fuso alla cavità

È importante sottolineare che non sempre sono presenti queste quattro strutture. Analizzando ingegneristicamente la colata ciò che preme è determinare l’area della sezione trasversale del canale di colata. Per effettuare ciò trascureremo gli attacchi di colata.



Dimensionamento canale di colata

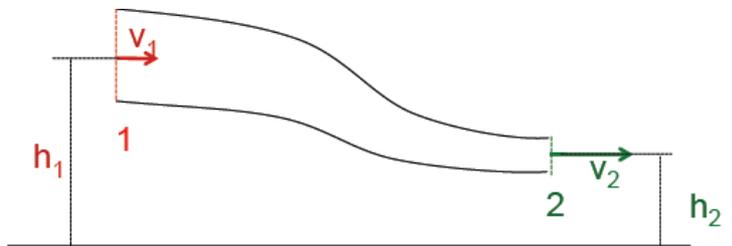
Dimensionare vuol dire trovare la superficie della sezione di strozzatura, cioè quella a diametro più piccolo, e la velocità di colata in modo tale da far sì che il tempo di riempimento della cavità debba essere tale da evitare che il materiale solidifichi prima di aver riempito completamente la forma. Dal momento che non si hanno ancora gli strumenti per determinare il tempo di riempimento ipotizziamo che questo sia dato: l'opera di dimensionamento consisterà dunque nel valutare velocità e superficie. Come è già stato accennato si hanno due principali vincoli: uno sul tempo e una sulla velocità massima.

La prima relazione che introduciamo è la legge di continuità secondo cui la portata volumetrica Q , assumendo un fluido incomprimibile e una forma con pareti impermeabili, deve essere costante:

$$Q = vA = cost$$

Introduciamo così una terza variabile: la portata Q . Applicando la legge di continuità a due sezioni qualunque del canale si avrebbe che:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$



Per esprimere ora il legame tra tempo di riempimento t_{MF} , velocità v e volume V usiamo la relazione:

$$t_{MF} = \frac{V}{Q} = \frac{V}{Av}$$

$$A = \frac{V}{vt_{MF}}$$

Per dimensionare il canale di colata e quindi conoscere la superficie A occorre la velocità v . Per ricavare questa variabile ed esprimerla in relazione alla geometria della forma è necessario applicare il teorema di Bernoulli, che afferma che la somma dell'energia potenziale, della pressione e dell'energia cinetica è costante, a tre diverse situazioni:

1. Colata in gravità = in questo tipo di colata si ha la presenza della cavità nella semistaffa inferiore della forma. Il materiale quindi effettivamente entra nella cavità fino al riempimento totale della forma.

Premessa comune a tutte e tre le situazioni: per prima cosa è necessario dichiarare che sezione stiamo considerando. In questo caso considereremo due sezioni: la prima è la sezione iniziale mentre la seconda è la sezione del canale di colata quando il materiale entra nella cavità. Creiamo poi un sistema di riferimento lineare e quindi prendiamo la x in modo che valga 0 lungo la linea di separazione delle staffe e h_1 in corrispondenza dell'altezza della forma. Utilizziamo poi il teorema di Bernoulli e analizziamo tale equazione per i due diversi punti del canale:

$$\rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 = \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_2$$

$$\begin{array}{l} A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad A_1 \gg A_2 \quad v_2 \gg v_1 \quad \text{semplificando } v_1 \cong 0 \rightarrow v_1 = 0 \\ P_1 = P_2 = P_{atm} \quad \text{su entrambe le sezioni agisce la stessa pressione atmosferica} \\ h_2 = 0 \quad \text{per come abbiamo scelto il sistema di riferimento} \end{array}$$

$$\rho gh_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$gh_1 = \frac{1}{2}v_2^2$$

$$v_2^2 = 2gh_1$$

$$v_2 = v_{grav} = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{2gh_{grav}} \quad \sqrt{h_{grav}} = \sqrt{h_1}$$

Negli istanti successivi la situazione è la medesima poiché si possono applicare le stesse semplificazioni qui apportate.

2. Colata in sorgente = in questo tipo di colata la cavità è ottenuta nella semistaffa superiore. Si chiama in sorgente perché il materiale viene fatto entrare nella cavità dal basso verso l'alto. Il principale vantaggio di questa metodologia di colata è evitare che il materiale entri nella cavità avendo un regime turbolento.

Avendo fatto la stessa premessa del caso precedente iniziamo a considerare istanti diversi di tempo:

$$t_0 = 0 \quad \text{situazione uguale alla colata in gravità} \quad v_2 = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{2gh_{grav}}$$

t_1 negli istanti successivi la situazione cambia perché man mano che la cavità si riempie, il materiale sarà soggetto a una contropressione che sarà diversa dalla quella atmosferica dunque l'analisi del teorema di Bernoulli sarà differente. Indicando con x_1 il livello a cui è arrivato il materiale fuso nella cavità si avrà:

$$\rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 = \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_2$$

$$\begin{array}{l} A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad A_1 \gg A_2 \quad v_2 \gg v_1 \quad \text{semplificando } v_1 \cong 0 \rightarrow v_1 = 0 \\ P_1 = P_{atm} \quad \text{sulla prima sezione agisce una pressione che è pari a quella} \\ \text{atmosferica} \\ P_2 = P_{atm} + \rho gx_1 \quad \text{sulla seconda sezione agisce la contropressione} \\ h_2 = 0 \quad \text{per come abbiamo scelto il sistema di riferimento} \end{array}$$

$$\rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + P_2$$

$$\rho g h_1 + P_{atm} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + P_{atm} + \rho g x_1$$

$$\rho g h_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g x_1$$

$$g h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + g x_1$$

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - x_1)}$$

t_f poco prima del riempimento completo, indicando con b l'altezza massima della cavità, la velocità sarà:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - b)}$$

Dunque la velocità nella sezione 2 sarà inferiore rispetto a quella della sezione 1 e quindi la funzione velocità decrescerà. Nella formula del dimensionamento si sceglie di usare come velocità il valore medio calcolato come:

$$\bar{v}_2 = v_{sorg} = \sqrt{2g} \left(\frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_1 - b}}{2} \right) = \sqrt{2g h_{sorg}}$$

$$\sqrt{h_{sorg}} = \frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_1 - b}}{2}$$

3. Colata mista o in piano = in questo tipo di colata la cavità è contenuta sia nella semistaffa superiore che in quella inferiore. In questo caso il primo tratto di colata è identico alla colata in gravità (il metallo si accumulerà fino a che non andrà a riempire la parte superiore), mentre il secondo tratto sarà invece identico alla colata in sorgente. Chiamiamo r_1 la parte di getto nella semistaffa inferiore e r_2 la parte di getto nella semistaffa superiore. È dunque necessario combinare questi due effetti:

$$V_1 = r_1 V \quad V_2 = r_2 V$$

$$t_{MF} = t_{MF1} + t_{MF2} = \frac{r_1 V}{v_{grav} A} + \frac{r_2 V}{v_{sorg} A} = \frac{V}{A} \left(\frac{r_1}{v_{grav}} + \frac{r_2}{v_{sorg}} \right)$$

$$\frac{V}{A} \left(\frac{r_1}{v_{grav}} + \frac{r_2}{v_{sorg}} \right) = \frac{V}{A v_{piano}}$$

$$\frac{r_1}{v_{grav}} + \frac{r_2}{v_{sorg}} = \frac{1}{v_{piano}}$$

$$v_{piano} = \sqrt{2g h_{piano}} = \frac{1}{\frac{r_1}{\sqrt{2g h_{grav}}} + \frac{r_2}{\sqrt{2g h_{sorg}}}} = \frac{1}{\frac{r_1}{\sqrt{2g h_{grav}}} + \frac{r_2}{\sqrt{2g h_{sorg}}}}$$

$$\sqrt{h_{piano}} = \frac{1}{\frac{r_1}{\sqrt{h_{grav}}} + \frac{r_2}{\sqrt{h_{sorg}}}}$$

Processo di colata: fase 2 – solidificazione e raffreddamento

Il metallo fuso dopo essere stato versato nella forma/stampo, si raffredda e solidifica. Gli aspetti legati alla solidificazione sono:

- Tempo di solidificazione del metallo
- Fenomeno di ritiro
- Progettazione della materozza
- Solidificazione direzionale

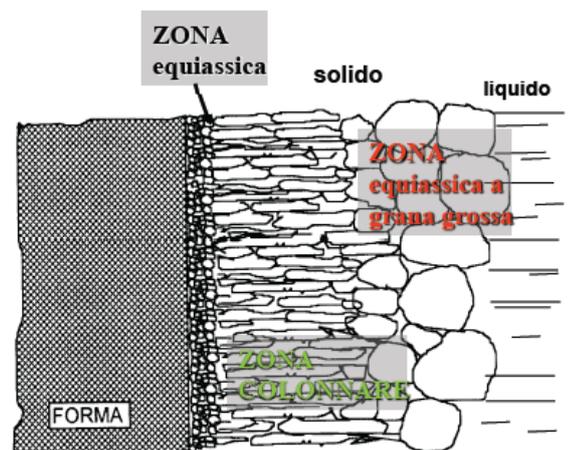
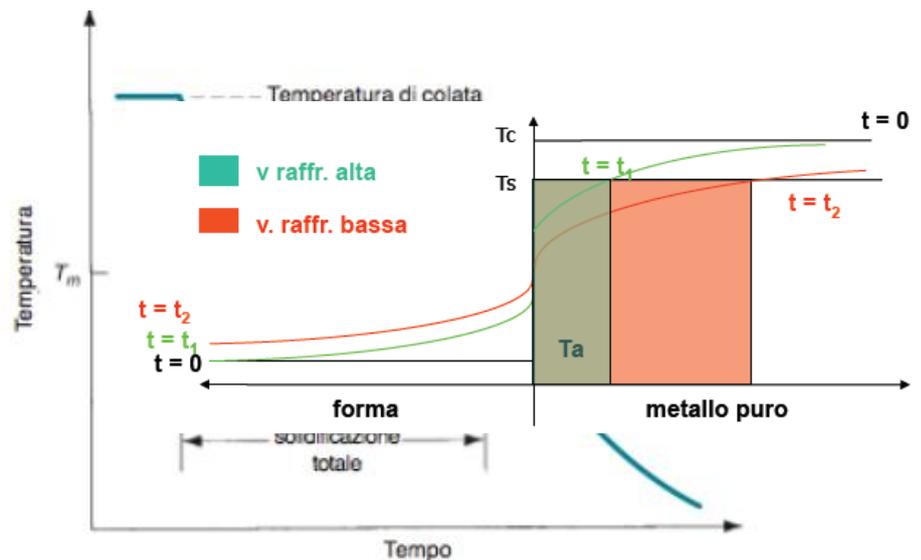
Solidificazione e raffreddamento: tempo nei metalli puri

La solidificazione comporta il passaggio di stato del materiale dallo stato di fuso allo stato di solido. Il processo di solidificazione cambia a seconda che il metallo sia puro o una lega: queste due diverse tipologie di materiali si differiscono principalmente nella fase di passaggio di stato.

Nella curva di raffreddamento dei metalli puri la temperatura inizialmente diminuisce poiché il metallo scambia calore con la forma, non con l'aria. Cedendo calore alla forma il metallo si raffredda fino al raggiungimento della temperatura del passaggio di stato. A questo punto la temperatura rimane costante fino a che tutto il pezzo è solidificato; questo perché il processo di solidificazione è isoterma. Una volta essersi solidificato la temperatura del pezzo inizia a scendere nuovamente fino al raggiungimento della temperatura ambiente.

Quando $t = 0$ la temperatura di colata è molto più alta della temperatura ambiente quindi si avrà un gradiente termico, cioè una variazione di temperatura, particolarmente alto. Tale gradiente risulterà essere sempre minore al passare del tempo e quindi anche la velocità di raffreddamento diminuirà al progredire della solidificazione verso il cuore del pezzo.

Negli istanti iniziali dunque l'interfaccia del materiale, cioè la parte di materia che per prima scambia calore con la forma, cede calore alla forma quindi avrà diminuito la sua temperatura che risulterà essere inferiore a quella di solidificazione. Il materiale nel cuore avrà una temperatura maggiore di quella di solidificazione e quindi sarà ancora liquido. La solidificazione avanza dall'interfaccia al cuore del pezzo: se, per quanto riguarda il materiale all'interfaccia, la solidificazione è un processo molto veloce, man mano che ci si sposta verso il cuore del pezzo diventerà sempre più lenta. Si parla dunque di solidificazione direzionale. Questa diversa velocità di solidificazione comporta proprietà meccaniche disomogenee all'interno del getto a causa del diverso aspetto microscopico del materiale stesso. Nella parte all'interfaccia si avranno grani equiassici cioè grani molto piccolo. Nella zona che solidifica più lentamente i grani hanno invece una forma colonnare e quindi hanno preferenza direzionale (direzione dello scambio termico). Già nella zona avente questi grani colonnari le proprietà meccaniche del materiale iniziano a diminuire. Il fenomeno secondo cui la resistenza alla deformazione di un materiale dipende dalla direzione di applicazione del carico è noto come anisotropia. Infine, nel del cuore del pezzo si perde l'effetto direzione dello scambio termico, i grani continuano a nucleare senza seguire però una direzione preferenziale: i grani saranno dunque equiassici a grana grossa.



Nella struttura finale di un getto fuso è auspicabile avere un'elevata velocità di raffreddamento complessiva così da ridurre la disuniformità microstrutturale e da garantire una grana fine che comporta buone caratteristiche meccaniche. Ciò si può ottenere mediante:

- Spessori ridotti che aumentano gli effetti di bordo = se lo spessore è ridotto aumentano gli effetti di bordo. Se però lo spessore è troppo ridotto ci sono rischi di mancati riempimenti della forma.
- Rugosità della forma grazie all'uso di una forma scabra = se la forma è scabra aumenta la velocità di scambio termico poiché aumenta la superficie di scambio; ciò peggiora però la finitura superficiale del getto

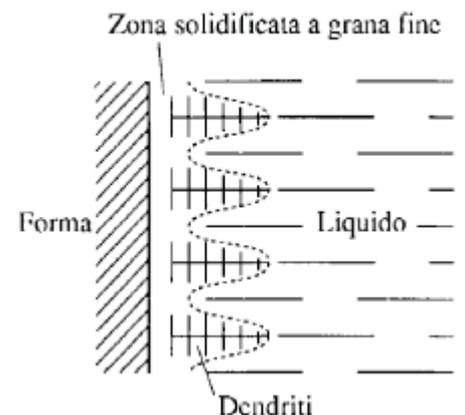
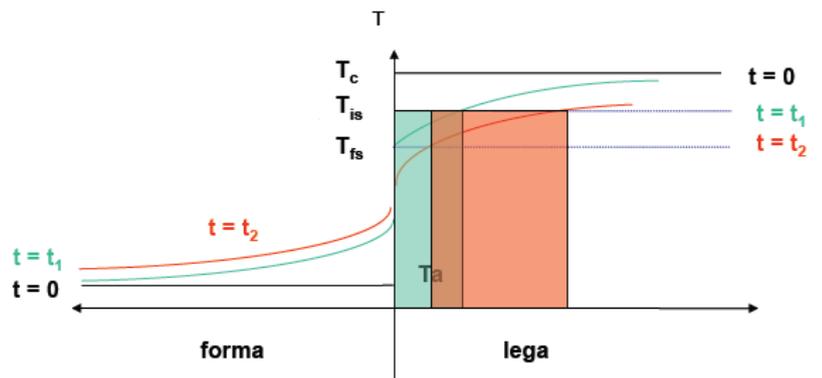
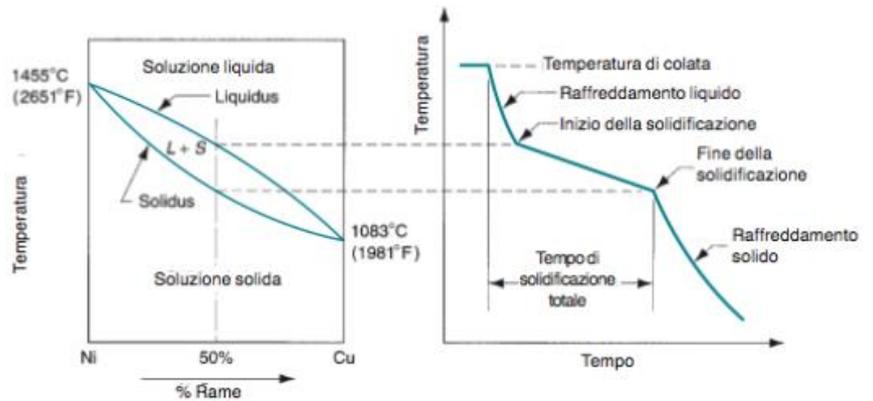
Spesso capita però di aver a che fare con leghe e non con metalli puri.

Solidificazione e raffreddamento: tempo nelle leghe

Il processo di solidificazione cambia a seconda che il metallo sia un elemento puro o una lega. Occorre trattare questa situazione a parte poiché nelle leghe il passaggio di stato non avviene a temperatura costante, questo perché gli elementi in lega sono diversi e dunque solidificheranno a diverse temperature. È possibile capire cosa succede durante la fase di solidificazione, a seconda della composizione media della lega, grazie al diagramma che rappresenta la curva di raffreddamento delle leghe. Tale grafico permette di capire l'intervallo di tempo in cui avviene la solidificazione e inoltre consente di comprendere quale sia la composizione solida e liquida durante la solidificazione stessa, nell'intervallo di tempo considerato. Analizziamo ora cosa accade alla concentrazione dei due elementi in fase liquida e solida durante la solidificazione:

- Fase solida = in questa fase si avrà una maggiore concentrazione dell'elemento che solidifica prima
- Fase liquida = si ha maggiore concentrazione dell'elemento che solidifica dopo.

Nel caso di solidificazione di leghe metalliche occorre identificare, oltre alla temperatura di colata, anche quella ambiente e quelle di inizio e fine solidificazione. Analizziamo ora la dinamica della solidificazione: in una prima fase si avrà una velocità di raffreddamento alta con conseguente formazione di grani equiassici nella zona di pezzo che interfaccia la forma. Aumentando il tempo i gradienti diminuiscono, la velocità di scambio termico è più ridotta dunque il raffreddamento è più lento e la temperatura del metallo diminuisce ma risulta ancora maggiore della temperatura di fine solidificazione quindi nella lega coesisterà una parte liquida e una solida. In questa fase si avrà una struttura dendritica costituita da dendriti, cioè strutture ad albero costituite da fase solida immerse in fase liquida. La principale conseguenza della formazione delle dendriti è che il fronte di avanzamento della fase solida non è più piano, come lo era nei metalli puri, ma è dendritico verso il cuore del getto. Un'eccezione a ciò sono le leghe eutettiche che sono caratterizzate anch'esse da un fronte piano poiché l'intervallo tra la temperatura di inizio e quella di fine solidificazione è nullo. La grandezza della zona dendritica dipenderà dall'ampiezza dell'intervallo delle temperature di inizio e fine solidificazione. Maggiore è l'intervallo di tempo tra queste due temperature più estesa sarà la zona dendritica. Altro elemento che influenza l'ampiezza della zona dendritica è il materiale di cui è costituita la forma: se si



ha una forma in sabbia, la velocità di scambio termico è più bassa quindi il tempo di formazione delle dendriti è più alto e dunque le strutture saranno più estese, viceversa, se si hanno forme metalliche si ha una velocità di scambio termico alto, un tempo di formazione delle dendriti più basso e quindi strutture più ridotte.

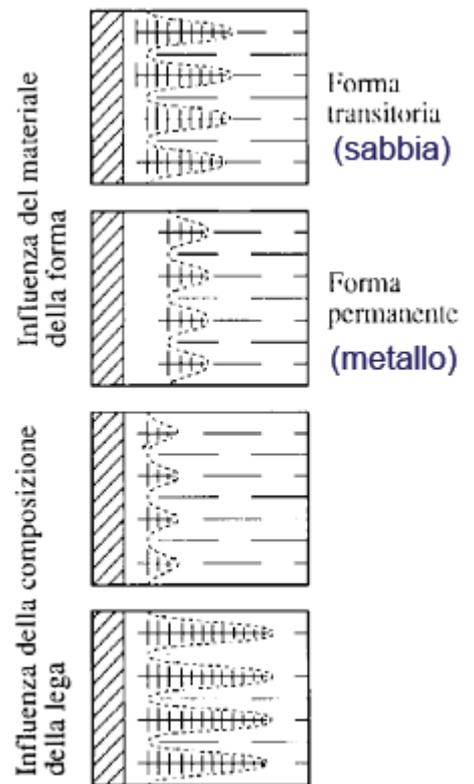
Le strutture dendritiche interessano quindi la parte di metallo fuso che solidifica lentamente. La cosa importante da sottolineare è che nelle zone dendritiche la concentrazione degli elementi sarà fortemente disomogenea poiché sarà presente una concentrazione maggiore della fase che solidifica prima: si ha così una disuniformità spaziale elevata. La formazione di queste strutture, che seguono la direzione dello scambio, tende a mantenere nella zona più esterna, verso la superficie del pezzo, l'elemento della lega che solidifica prima e nella zona più interna, nel cuore, l'elemento che solidifica dopo. Si ha dunque il fenomeno della segregazione cioè la disomogeneità nella distribuzione dei componenti di una lega metallica. La segregazione può essere di due tipi:

1. Macro = guarda all'uniformità della composizione degli elementi in lega a livello macro (tutto il pezzo)
2. Micro = guarda alla differenza di concentrazione a livello micro e quindi a livello dendritico (singola dendrite)

Per evitare la segregazione è opportuno avere delle dendriti limitate. Negli istanti di tempi successivi i gradienti termici risulteranno ancora più bassi, non si avrà un flusso termico direzionale e quindi i grani saranno grossi. Anche nel caso di leghe è dunque auspicabile avere elevata velocità complessiva di raffreddamento; ricordiamo che nelle leghe la struttura del pezzo non dipenderà dalla sola velocità di raffreddamento ma anche dal tenore di carbonio, specie negli acciai.

Durante la solidificazione occorre quindi tenere conto di una serie di problemi che potrebbero presentarsi:

- Microsegregazione
- Anisotropia
- Porosità interdendritica = a causa della formazione di strutture dendritiche molto pronunciate si creano delle zone cave che non sono facilmente raggiunte dal metallo fuso



Solidificazione e raffreddamento: tempo (legge)

Come abbiamo capito la solidificazione dei metalli puri e delle leghe richiede del tempo. Il tempo di solidificazione totale è il tempo che occorre dalla colata affinché il pezzo solidifichi. Questo tempo dipende dalle dimensioni e dalla forma del pezzo secondo una relazione empirica, nota come regola di Chvorinov:

$$T_{TS} = C_m M^n$$

Dove:

- | | |
|----------|--|
| T_{TS} | tempo di solidificazione totale [min] |
| C_m | costante sperimentale della forma [min/cm ²] |
| M | modulo termico [cm] |
| n | esponente sperimentali adimensionale, di solito è pari a 2 |

La costante sperimentale della forma dipende dalle condizioni di colata in modo particolare dipender dal materiale della forma, dalle proprietà termiche del metallo colato e dalla temperatura a cui viene effettuata la colata. Il tempo dipenderà dunque dal modulo termico M . Tale valore rappresenta il rapporto tra il volume di un getto e la superficie totale di scambio termico tra il getto e la forma:

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

Dunque maggiore è il volume da far solidificare e minore è la superficie di scambio termico, maggiore sarà il tempo di solidificazione, viceversa minore è il volume da far solidificare e

maggiore è la superficie di scambio termico, minore sarà il tempo di solidificazione. Il modulo termico si può calcolare per l'intero getto o per una parte di esso e permette di capire quali zone solidificano prima e quali dopo, combinandolo potremo capire la direzione di solidificazione.

Solidificazione e raffreddamento: fenomeno del ritiro

Durante il raffreddamento e la solidificazione il volume del materiale si riduce. Dalla temperatura di colata alla temperatura ambiente si incontrano tre ritiri differenti:

1. Durante il raffreddamento liquido (o in fase liquida) = tra temperatura di colata e quella di inizio solidificazione
2. Durante la fase solidificazione = tra temperatura di inizio solidificazione e fine solidificazione
3. Durante il raffreddamento in fase solida = tra temperatura di fine solidificazione e temperatura ambiente

In generale però affermeremo che il ritiro può avvenire in due grandi fasi:

- Dalla temperatura di colata alla temperatura di solidificazione = in questo caso useremo come coefficiente per misurare tale ritiro quello del ritiro volumetrico
- Dalla temperatura di solidificazione alla temperatura ambiente = il coefficiente per misurare questo ritiro è il coefficiente di ritiro lineare

Analizziamo ora questi due coefficienti che quantificano il ritiro:

- Ritiro volumetrico percentuale = è un indicatore che fornisce la differenza di volume alla temperatura di colata e alla temperatura di fine solidificazione rispetto al volume che si aveva alla temperatura di colata. Generalmente il volume si riduce del 3%:

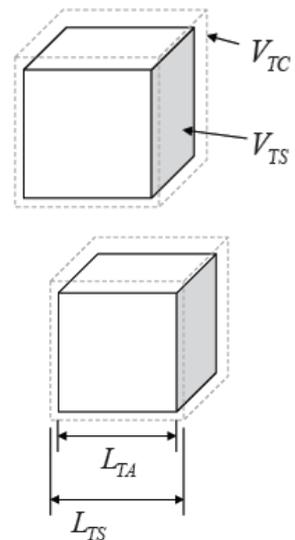
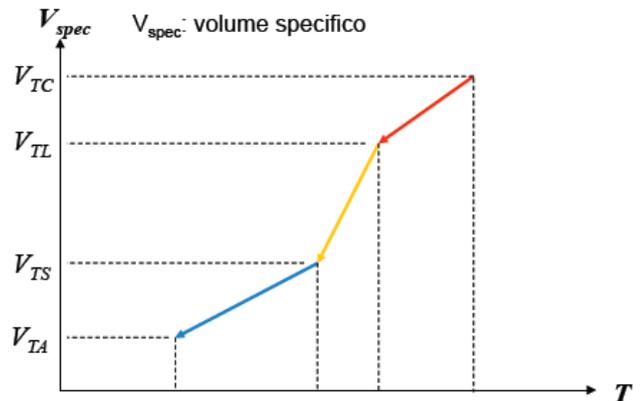
$$r_v = \frac{V_{TC} - V_{TS}}{V_{TC}}$$

- Ritiro lineare percentuale = è un indicatore che fornisce utile a identificare il ritiro durante la fase solida. In questo caso la variazione di volume è determinata dalla variazione delle singole lunghezze che determinano la geometria del pezzo. Tali lunghezze si riducono della stessa entità. Dunque indica la percentuale con cui le varie dimensioni si ritirano. È definito come una differenza di lunghezza rispetto alla lunghezza di fine solidificazione:

$$r_L = \frac{L_{TS} - L_{TA}}{L_{TS}}$$

Il ritiro in fase di raffreddamento liquido e di solidificazione si compensa attraverso l'uso di materozze cioè dei serbatoi di materiale liquido che vengono collegate alla cavità e consentono, se ben dimensionati, di fornire materiale liquido all'interno della cavità per compensare il ritiro durante la fase di solidificazione. Il materiale all'interno della materozza deve rimanere liquido per un tempo maggiore di quello del getto così da raffreddarsi dopo il getto stesso e infine deve fornire un volume di materiale sufficiente a compensare il volume del materiale ritirato. Anche la materozza però sarà a contatto con la terra e quindi anch'essa sarà portata a raffreddarsi: la materozza non può quindi essere progettata per contenere la sola quantità necessaria alla compensazione del volume; sarà necessario quindi dimensionare la materozza in modo da far sì che questa contenga la giusta quantità di materiale durante tutto il processo nonostante l'essere a contatto con la sabbia. Non si può usare una materozza troppo grande perché altrimenti si avrebbe un problema di costi di processo. Le materozze dunque, se posizionate e dimensionate correttamente sono le ultime a solidificare.

Per contrastare invece il ritiro in fase solida è necessario sovradimensionare la cavità di una quantità pari al ritiro. Per effettuare tale passaggio è possibile utilizzare i tipici valori di ritiro lineare per i diversi materiali fusi, ottenibili grazie a delle tabelle. È importante non fare confusione tra il sovrametallo e il sovradimensionamento effettuato per contrastare il ritiro in



fase solida: il sovrametallo è un sovradimensionamento della cavità nel passaggio tra il disegno del pezzo finito e il disegno del getto.

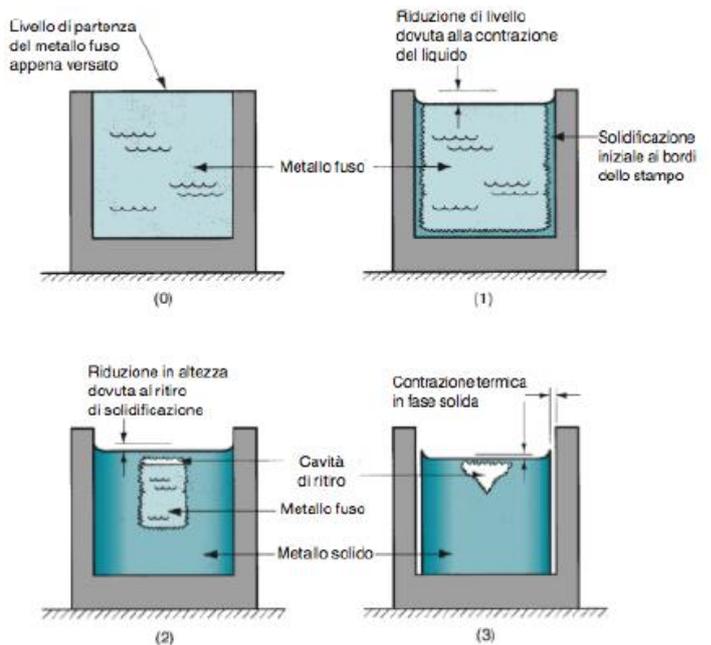
TABELLA 6.1 Tipici valori di ritiro lineare per diversi metalli fusi a causa della contrazione termica in fase solida.

Metallo	Contrazione lineare	Metallo	Contrazione lineare	Metallo	Contrazione lineare
Leghe di alluminio	1.3 %	Magnesio	2.1 %	Acciaio al cromo	2.1 %
Ottone giallo	1.3 % – 1.6 %	Leghe di magnesio	1.6 %	Stagno	2.1 %
Ghisa grigia	0.8 % – 1.3 %	Nichel	2.1 %	Zinco	1.6 %
Ghisa bianca	2.1 %	Acciaio al carbonio	1.6 % – 2.1 %		

Analizziamo ora come avviene il ritiro commentando le immagini in figura:

0. Nella prima figura la forma, che in questo caso è a cielo aperto, viene completamente riempita di metallo fuso.
1. Nella seconda immagine si può osservare l'inizio della solidificazione. Una volta riempita la cavità, il materiale inizia a raffreddarsi nella porzione all'interfaccia con la sabbia e con l'aria. La velocità di raffreddamento della parte a contatto con l'aria sarà diversa da quella a contatto con la sabbia poiché l'aria avrà un coefficiente di scambio termico diverso rispetto a quello della sabbia. Una certa quantità di materiale avrà subito una contrazione e si ha quindi un abbassamento di livello.
2. Nella terza immagine si osserva l'aumento dello spessore della zona solidificata. Rimane però il cuore liquido e si inizia a formare una cavità di ritiro poiché la pelle superiore del pezzo è già solidificata quindi il liquido all'interno di ritira. Si osserverà inoltre un ulteriore abbassamento marginale del livello.
3. Nell'ultima immagine la cavità è ormai ben definita all'interno del pezzo. Inoltre la variazione di volume si osserva anche grazie a un distacco del getto dalla forma. Nella solidificazione in forma aperta lo spessore dello strato di solidificazione varia poiché una parte è a contatto con l'aria mentre un'altra con la sabbia.

Come abbiamo osservato la cavità si va a generare nella zona del pezzo che solidifica per ultima quindi bisognerà posizionare la materozza proprio in prossimità di questa zona che solidifica per ultima così da poterla riempire.



Le materozze

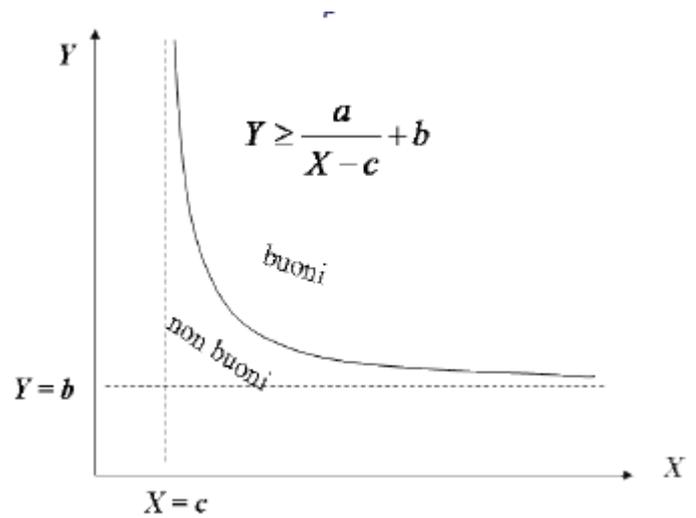
Per posizionare le materozze occorrerà dunque conoscere la zona del pezzo che solidifica per ultima. Per intuire ciò è possibile sfruttare il modulo termico. Analizzando la figura a lato è possibile affermare che il modulo termico aumenta da sinistra a destra. Dunque solidificherà per prima la parte 1 e per ultima la parte 4: il materiale che mancherà in 1 a causa del ritiro verrà fornito da 2, il materiale mancante in 2 sarà fornito da 3 e così via. Se non si aggiungesse una materozza collegata al solido 4 si avrebbe la formazione di una grande cavità con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche del pezzo. Affinché ciò non accadesse è necessario posizionare una materozza così che fornisca al solido 4 il materiale mancante. Se si dimensionerà correttamente la materozza il cono di ritiro sarà tutto contenuto nella materozza stessa che poi verrà eliminato e si otterrà così un pezzo sano. Per fare in modo che la materozza solidifichi dopo il pezzo è sufficiente che il modulo termico della materozza sia maggiore del modulo termico del pezzo:

$$M_m = 1,2M_p$$

Per capire dunque la direzione di solidificazione si divide il getto in geometrie elementari, si calcolano i moduli termici di questi sotto volumi e, in base alla dinamica dei moduli termici, si può comprendere quali zone solidifichino per ultime e quindi dove posizionare le materozze. La cosa importante è saper scegliere in quante parti suddividere il volume totale: non ci interessa una precisione assoluta, ci interessa capire la zona. Quindi il numero di parti in cui dividere il volume deve essere ridotta.

Il metodo più usato per dimensionare le materozze è l'uso del diagramma di Caine. Sperimentalmente avevamo intuito che per dimensionare una materozza occorre conoscere il modulo termico e il volume. In tale diagramma sull'asse delle ascisse e su quello delle ordinate vengono identificati due punti:

$$X = \frac{M_m}{M_p} \qquad Y = \frac{V_m}{V_p}$$



Il pedice p indica il volume del pezzo che è legato a quella materozza (se c'è una sola materozza V_p è tutto il volume del pezzo, se ce ne sono 2 V_p è la metà del volume totale). X è generalmente maggiore di 1. Sperimentalmente Caine ricavò una curva, rappresentata nel grafico, che divide il piano in due zone dove i pezzi sono rispettivamente buoni o non buoni. Operativamente si sceglie un punto X_0 e Y_0 nella zona dei pezzi buoni e si ricava il sistema:

$$\begin{cases} M_m = X_0 M_p \\ V_m = Y_0 V_p \end{cases}$$

La curva è una funzione che vale:

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

Dove:

- a costante sperimentale, che vale 0'1 per gli acciai
- b è il coefficiente di contrazione volumetrica r_V
- c velocità di raffreddamento relativa materozza-terza vs getto-terra. Dice quanto è diversa la velocità di scambio termico tra la materozza e la terra e il getto e la terra (tipicamente vale 1 se non è coibentata cioè limita lo scambio termico, se lo è la velocità di raffreddamento materozza-terra è minore di quella getto-terra quindi il valore è minore di 1)

Analizziamo ora cosa succede se:

- $x \rightarrow \infty$ cioè se la velocità di raffreddamento della materozza è infinitamente più piccola della velocità di raffreddamento del getto il volume della materozza necessario a contrastare la contrazione del getto è pari alla contrazione del getto stesso.

$$x = \frac{M_m}{M_g} \rightarrow \infty \qquad y = \frac{V_m}{V_g} = b$$

- $x \rightarrow c$ cioè se materozza e getto solidificano con la stessa velocità di raffreddamento, e quindi hanno stesso modulo termico e sono a contatto con la stessa terra: il volume della materozza necessario a contrastare la contrazione del getto tende all'infinito.

$$x = \frac{M_m}{M_g} \rightarrow c \qquad y = \frac{V_m}{V_g} = \infty$$

Una volta fissato il valore di x occorre comprendere come scegliere il valore y lontano dal ginocchio, cioè dalla curva. Per effettuare tale scelta si ricorre spesso all'uso di materozze standard i cui valori sono tabulati. Normalmente si determina il valore δ cioè il rapporto tra l'altezza e il diametro: è compreso tra 0,5 e 1,5. Il rapporto tra altezza e diametro è noto come rapporto di forma:

$$\delta = \frac{H}{D} \quad x = \frac{M_m}{M_p} \quad y = \frac{V_m}{V_p}$$

$$M_m = \frac{V_m}{S_m} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 H}{\pi D H + \frac{\pi}{4} D^2} = \frac{DH}{4H + D} = \frac{D\delta}{4\delta + 1}$$

$$D = \frac{4\delta + 1}{\delta} M_m$$

$$M_m = x M_p$$

$$y = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{\pi}{4} \delta D^3}{V_p} = \frac{\pi}{4} \frac{\delta}{V_p} \left(\frac{4\delta + 1}{\delta} M_m \right)^3 = \frac{\pi M_p^3 (4\delta + 1)^3}{4 V_p \delta^2} x^3$$

$$y = f(x) = kx^3$$

Effettuando la derivata della costante k rispetto a δ si può calcolare il valore di delta che corrisponde alla materozza più efficiente. Generalmente il valore δ , rappresentato nel grafico di Caine da delle curve isodelta può essere 0,5, 1 e 1,5:

$$k = \frac{\pi M_p^3 (4\delta + 1)^3}{4 V_p \delta^2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial \delta} = \frac{\pi M_p^3 (4\delta + 1)^2 2\delta - 1}{2 V_p \delta^2 \delta}$$

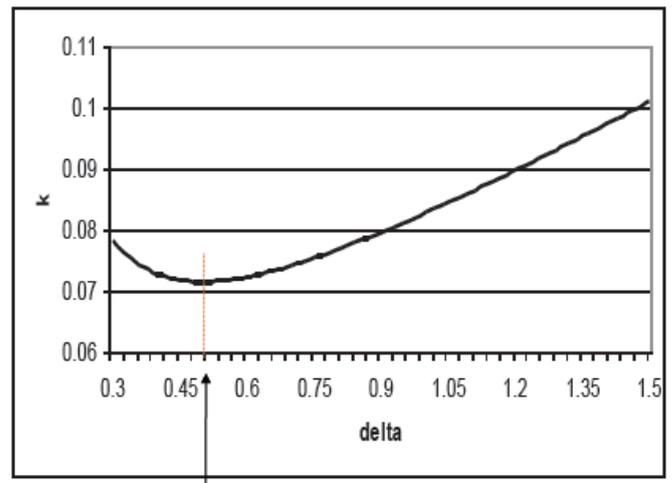
$$\frac{\partial k}{\partial \delta} = 0$$

$$\frac{\pi M_p^3 (4\delta + 1)^2 2\delta - 1}{2 V_p \delta^2 \delta} = 0$$

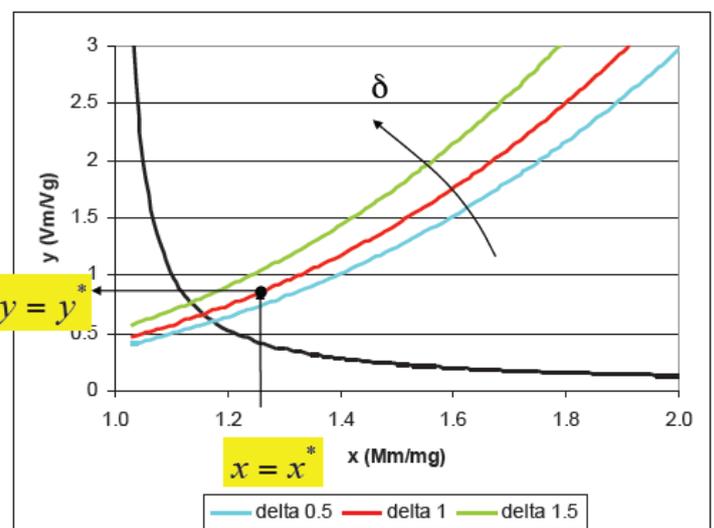
$$\frac{2\delta - 1}{\delta} = 0$$

$$\delta = \frac{1}{2} = 0,5$$

Dunque fissato il valore di δ si determina x e dunque si ricava y . Se si può conviene dunque scegliere una materozza con delta pari a 0,5 così da avere quella più efficiente cioè a parità di x fornisce il minimo valore di y . La materozza è coibentata quando è isolata cioè quando vi è uno strato di isolante tra la cavità e la forma in sabbia così da essere certi che questa raffreddi prima. In questo caso la velocità di

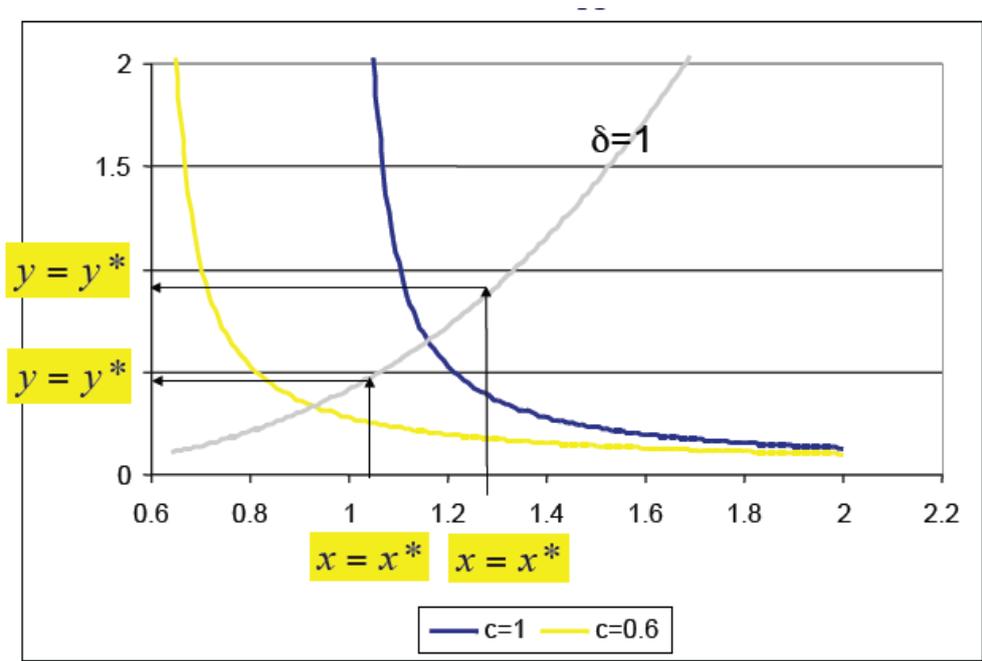


Minimo in 0.5



raffreddamento del materiale nella materozza è più lenta rispetto a quella del getto perché è appunto isolata e quindi il calore viene dissipato peggio. Il rapporto c è minore di 1; se c è minore di 1 la curva si sposta un po' verso sinistra e quindi si migliorano gli intervalli in cui scegliere la materozza utile.

Una volta deciso dove posizionare le materozze occorre fare attenzione al fatto che ogni materozza ha un raggio di influenza finito. Questo significa che al di là di una certa distanza dalla materozza si perde l'effetto di alimentazione della materozza stessa. Il motivo va ricercato nella fisica della solidificazione: il raggio di influenza può essere determinato in prima approssimazione con leggi empiriche. Nelle piastre, ad esempio, la larghezza deve essere maggiore di 3 volte dello spessore. Per evitare la porosità è possibile usare dei raffreddatori cioè delle frazioni metalliche che hanno temperatura di fusione maggiore di quella del getto e che si posizionano a contatto tra terra e cavità favorendo lo scambio termico tra getto e terra. La presenza di questi raffreddatori comporta che il fronte delle strutture dendritiche sia meno pronunciato.

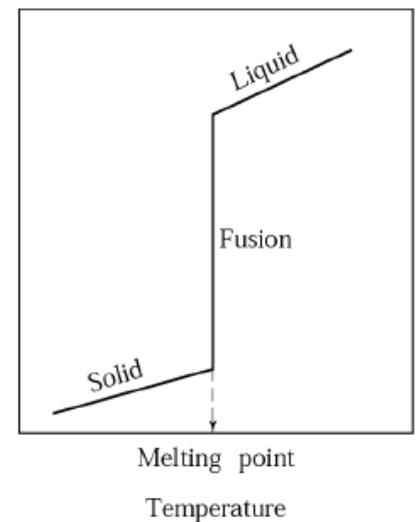


Solidificazione e raffreddamento: solidificazione direzionale

Come già citato nel caso in cui vi sia lo sviluppo di dendriti colonnari occorre evitare la formazione di microporosità dovute al ritiro di piccoli volumi isolati dalle dendriti. Per evitare il problema occorre ridurre la bada di solidificazione ad esempio aumentando il gradiente termico sia spaziale che temporale. La formazione di porosità all'interno del materiale può essere causata anche dalla presenza di idrogeno.

Durante la fase di solidificazione si possono ottenere dei getti difettosi caratterizzati da una porosità che non è dovuta a un'insufficiente alimentazione ma è causa dalla presenza di gas nel metallo. La solubilità di alcuni gas nei materiali metallici, infatti, decresce bruscamente nel passaggio liquido-solido. Grazie all'analisi del grafico che rappresenta la solubilità dell'idrogeno nella lega si osserva che questa diminuisce con il solidificarsi del metallo e dunque l'idrogeno si aggregerà. L'idrogeno nei processi di fonderia proviene principalmente dall'atmosfera: il risultato di una colata in lega di alluminio dipende fortemente dal tasso di umidità dell'aria. Il problema può essere risolto attraverso:

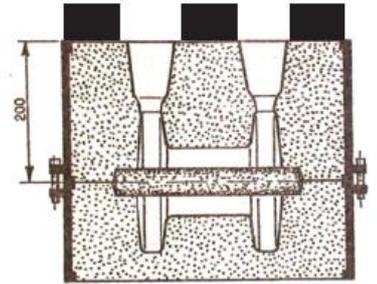
- Degassaggio chimico = all'interno della lega vengono inseriti degli elementi chimici che hanno grande affinità con il gas responsabile delle porosità. Si legano a quest'ultimo quando il materiale metallico è allo stato liquido formando una scoria solida che risale in superficie



- Fusione sotto vuoto = in questo modo si evita che il materiale fuso entri in contatto con l'atmosfera, evitando la contaminazione indesiderata
- Applicazione di una pressione = se la colata avviene sotto pressione diminuisce la formazione di porosità.

Spinte metallostatiche

Una volta colato, il metallo liquido all'interno della forma esercita una pressione sulla parete della forma stessa. L'integrale di tale pressione sulla superficie dell'impronta nella staffa superiore genera una spinta verso l'alto che tende a sollevare la staffa. Per impedire che questo avvenga si posizionano degli opportuni pesi sopra la staffa superiore: i contrappesi.



Solidificazione e raffreddamento: tensioni termiche residue

Analizziamo ora l'effetto del ritiro che avviene durante il raffreddamento del materiale già solido: il ritiro in fase solida genera un problema di tensioni termiche che sono causa di difetti o di un pezzo da scartare. Le tensioni residue sono sforzi che si generano nel materiale a causa della dinamica del materiale: corpi con geometria differente raffreddamento con velocità differenti e quindi con contrazioni istante per istante differenti. Le tensioni termiche residue possono dunque portare a deformazioni transitorie sia in campo elastico che in quello plastico. Il pezzo non si contrae in tutte le zone in maniera uguale. Grazie all'equazione di Chvorinov abbiamo capito che il modulo termico è ciò da cui dipende il tempo di solidificazione, anche quando parliamo di raffreddamento in fase solida possiamo riferirci al modulo termico come un importante indicatore: analizziamone il perché. La quantità di calore ceduto dal corpo è proporzionale a diversi elementi:

$$\Delta Q \propto S(T - T_A)\Delta t$$

$$\Delta Q \propto mc_p\Delta T = \rho Vc_p\Delta T$$

$$S(T - T_A)\Delta t \propto \rho Vc_p\Delta T$$

$$v = \frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{S}{V}(T - T_A)\rho c_p$$

ρc_p li trascuriamo poiché sono dei coefficienti e stiamo analizzando una proporzione e non una semplice equazione

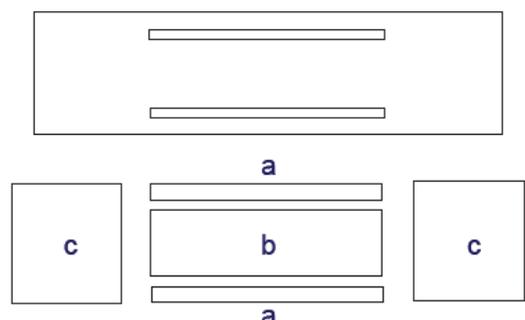
$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{S}{V}(T - T_A)$$

$$\frac{V}{S} = M \quad \rightarrow \quad \frac{S}{V} = \frac{1}{M}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{1}{M}(T - T_A)$$

Dunque la quantità di calore ceduta alla forma mediante la superficie di interscambio dipende dall'inverso del modulo termico e dalla differenza tra la temperatura del corpo e quella dell'ambiente ($T - T_A$).

Per comprendere il fenomeno delle tensioni termiche consideriamo ora una piastra avente due cavità, dette asole, e scomponiamola in 5 geometria elementari. Trascurando la



geometria c calcoliamo i moduli termici della porzione a e di quella b, immaginando che i corpi della piastra siano a sezione quadrata:

$$M_a = \frac{V_a}{S_a} = \frac{H_a^2 L}{4LH_a} = \frac{H_a}{4}$$

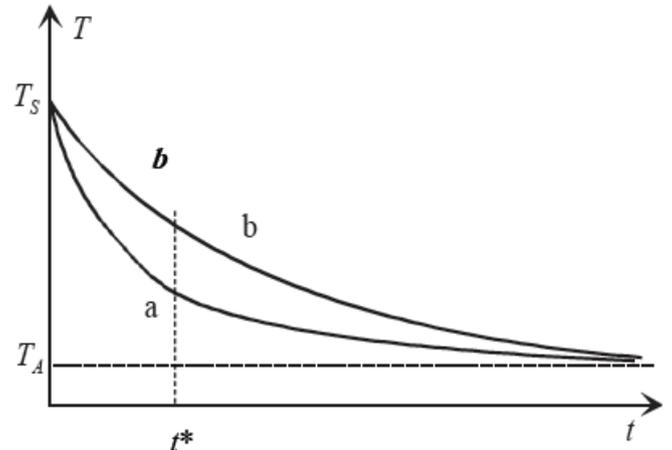
$$M_b = \frac{V_b}{S_b} = \frac{H_a H_b L}{2LH_a + 2LH_b} = \frac{H_a H_b}{2(H_a + H_b)}$$

Valutiamo ora quale delle due geometria ha modulo termico maggiore calcolandone il rapporto:

$$\frac{M_b}{M_a} = \frac{H_a H_b}{2(H_a + H_b)} \frac{4}{H_a} = \frac{2H_b}{(H_a + H_b)} = \frac{2}{\frac{H_a}{H_b} + 1}$$

$$H_b \gg H_a \rightarrow M_b > M_a$$

Osserviamo dunque che il modulo di b è maggiore del modulo di a e quindi ci aspettiamo che la velocità di b sia minore di quella di a. Per il tipo di legge che abbiamo ricavato in precedenza e per quest'ultima condizione si ha che la legge di raffreddamento è di tipo esponenziale negativo. Osservando il grafico si nota che all'istante iniziale i due corpi hanno la medesima temperatura T_s . In questo

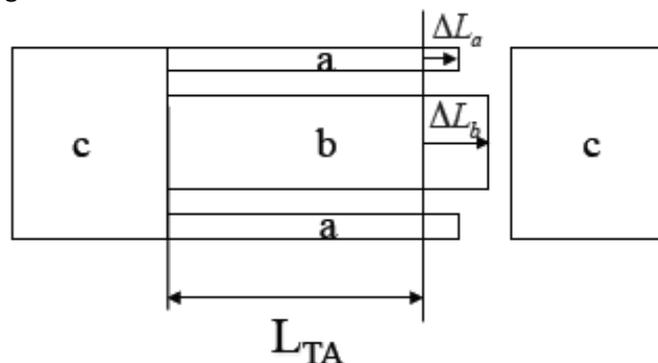


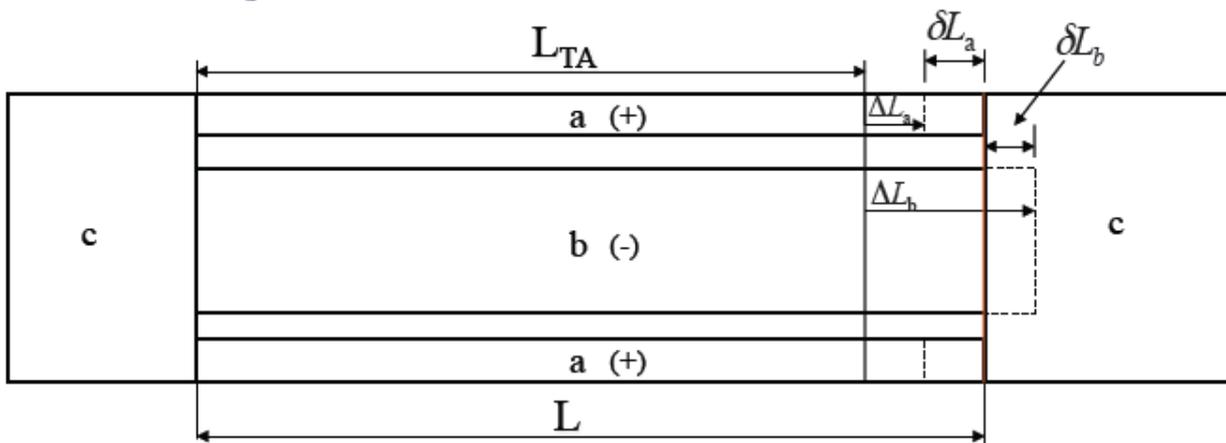
caso il primo termine dell'equazione, cioè l'inverso del modulo termico, pesa molto mentre il secondo no poiché $(T - T_A)$ è la stessa sia per la geometria a che per quella b. Durante l'avanzare del tempo si può affermare che il modulo termico rimane costante mentre varia $(T - T_A)$ infatti $(T_a - T_A) \neq (T_b - T_A)$. Al tempo t^* , dove il gap tra le temperature assume il massimo valore, si ha l'inversione della velocità di raffreddamento; si può dunque affermare che tale inversione avviene a causa del secondo termine. L'inversione della velocità può essere osservata anche a partire dalla pendenza delle due curve: nella prima fase del raffreddamento solido la geometria avente modulo termico inferiore ha una velocità di raffreddamento maggiore che si rispecchia in una curva più ripida mentre nella seconda fase le pendenze sono invertite. Vediamo ora come questa differenza di temperatura si impatti sulla lunghezza dei vari corpi. Per effettuare questo passaggio osserviamo la contrazione non come una riduzione di lunghezza dallo stato iniziale a quello finale ma come un allungamento dallo stato finale a quello iniziale. Se i due corpi fossero liberi e non vincolati alla geometria c l'allungamento assiale sarebbe:

$$\Delta L_a = L_{TA} \alpha (T_a - T_A)$$

$$\Delta L_b = L_{TA} \alpha (T_b - T_A)$$

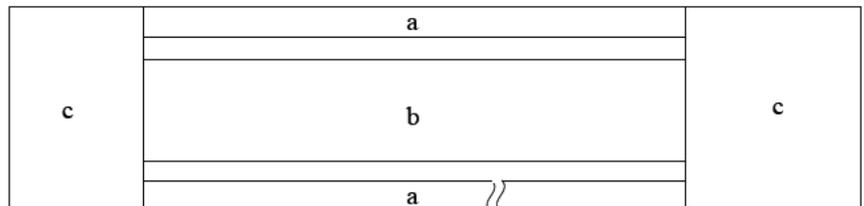
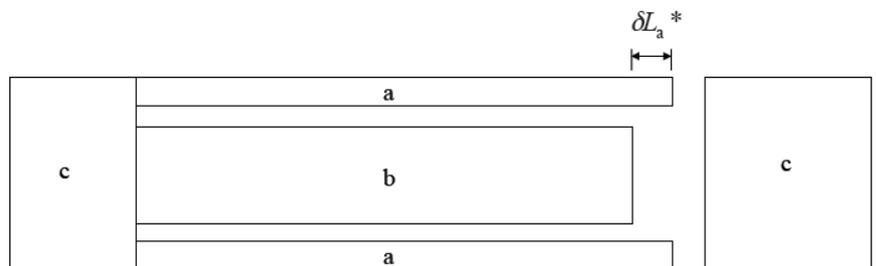
Dato che le temperature T_a e T_b sono diverse durante il raffreddamento di hanno delle lunghezze libere differenti. Se dunque le due geometria non fossero solidati a c istante per istante i due corpi dovrebbero avere delle lunghezze diverse. A t^* si ha la massima differenza di lunghezze tra i due corpi. In realtà però i corpi sono forzati ad avere istante per istante la stessa lunghezza perché non sono liberi ma sono collegati al corpo c. Rispetto al caso libero il corpo a sarà allungato di una certa quantità δL_a e quindi sarà sottoposto a una trazione mentre il corpo b sarà accorciato della stessa quantità δL_b e quindi sarà sottoposto a una compressione.





Possono quindi accadere tre diversi casi:

1. La sollecitazione nei due corpi rimane in campo elastico = non si ha alcun problema particolare.
2. La sollecitazione in uno dei due corpi (o entrambi) entra in campo plastico = le deformazioni che andiamo a verificare o in uno o in entrambi i corpi saranno permanenti quindi il corpo avrà una tensione permanente residua all'interno del corpo. Nel caso del nostro esempio supponiamo che solo nel corpo a la sollecitazione sia maggiore del calore dello snervamento. Il materiale fluisce plasticamente, allungandosi di una quantità δL_a^* . A temperatura ambiente questa deformazione plastica rimane: se i corpi fossero liberi, a risulterebbe essere più lungo di b.
3. La sollecitazione in uno dei due corpi supera il limite a rottura = il pezzo è uno scarto. In questo caso il corpo dove viene superato il limite arriva a rottura.



Per rimanere per primo caso e dunque evitare delle tensioni residue che porterebbero il corpo a imbarcamento (nel

caso di una trave a T, ad esempio) o a rottura occorre fare attenzione ai corpi facenti parte dello stesso pezzo e che presentano moduli termici eccessivamente differenti. Per evitare le tensioni conviene:

- Non avere zone molto differenti in modulo termico
- non avere parti massicce vicino a parti di spessore sottile
- non avere una variazione brusca degli spessori per distribuire le sollecitazioni

In ogni caso a valle della fonderia il pezzo viene trattato termicamente. Se così non fosse le tensioni interne potrebbero portare ad una variazione della geometria quando il pezzo viene lavorato successivamente asportando il materiale.