

Introduzione

Motivazione dello studio

- Le tecniche di fonderia sono le più antiche e versatili per la produzione di **greggi** o di **semilavorati** destinati alle lavorazioni successive (generalmente per deformazione plastica o per asportazione di truciolo).
- Esse permettono di ridefinire le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali metallici da costruzione in modo che essi possano soddisfare le richieste dei progettisti e di cancellare ogni traccia della storia passata dei materiali stessi.
- Le caratteristiche del materiale ottenuto dipendono in maniera fondamentale da come sono state condotte le operazioni di fonderia in quanto eventuali difetti originati, ad esempio, da una cattiva conduzione delle operazioni di colata permarrebbero anche nel prodotto finito.
- Non è da sottovalutare, infine, il ruolo di recupero delle materie prime e dell'energia che viene messo in atto mediante le lavorazioni per fusione.

Introduzione

Generalità

Delle numerose tecniche di fabbricazione per fusione noi ci occuperemo di:

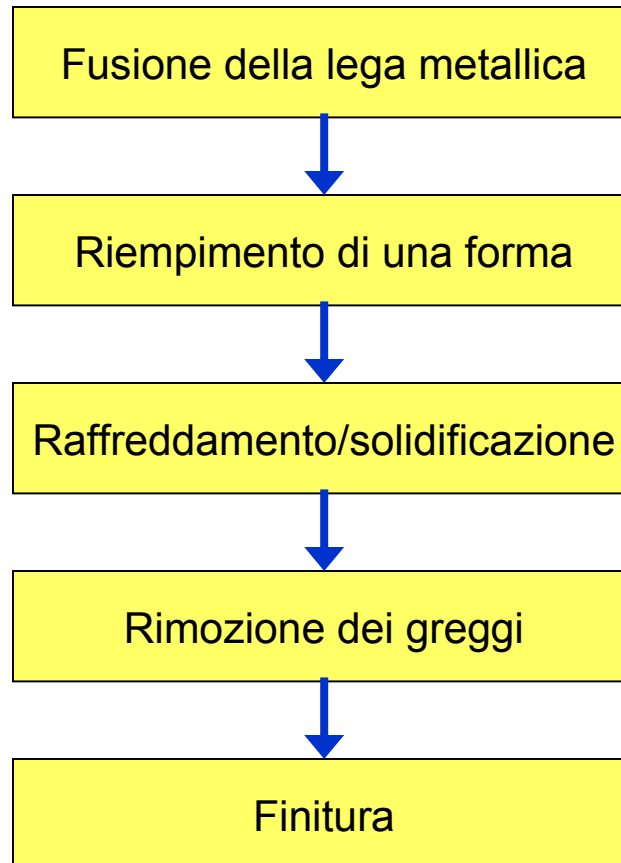
- Formatura in forma transitoria
 - Fusione in terra
 - Fusione in guscio o microfusione
- Formatura in forma permanente
 - Fusione in conchiglia
 - Colata centrifuga
- Colata continua

Ciascun metodo presentato possiede particolari caratteristiche di impiego per quanto riguarda il materiale, le dimensioni, la geometria, il tipo di lavorazioni successive richieste, il numero di pezzi, ecc., del greggio che si intende produrre.

Introduzione

Schema dei processi di produzione per fusione

Per portare a termine un processo di produzione per fusione, è necessario eseguire, in generale, le seguenti operazioni:



Introduzione

Vantaggi del processo

I vantaggi della produzione mediante fusione possono essere, in generale, così riassunti:

- ✓ Possibilità di ottenere manufatti quasi net-shape
- ✓ Gli scarti di materia prima sono bassi
- ✓ E' un processo relativamente veloce
- ✓ Permette di ottenere oggetti con forme complesse
- ✓ Permette di ottenere oggetti cavi
- ✓ Consente di produrre oggetti di grandi dimensioni
- ✓ La finitura superficiale ottenibile è generalmente soddisfacente

Introduzione



Introduzione



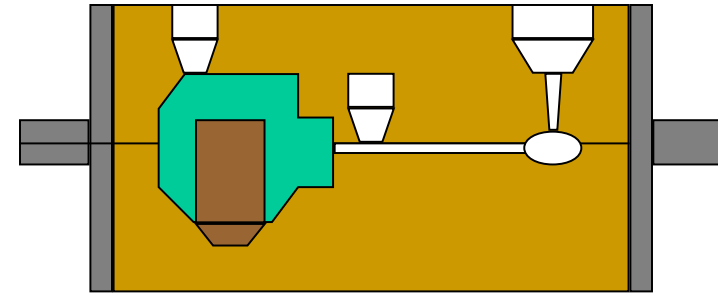
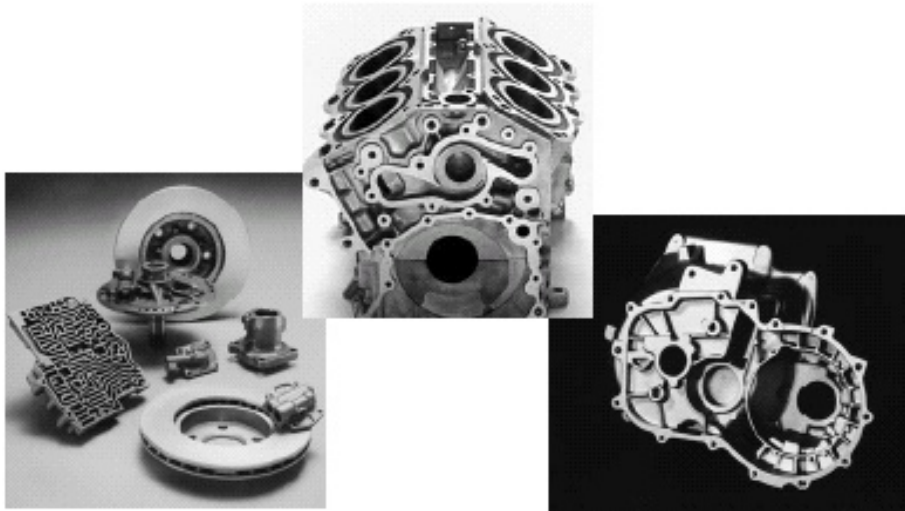
Introduzione

Svantaggi del processo

I principali svantaggi sono i seguenti:

- Problemi a rispettare le tolleranze dimensionali
- Presenza di difettosità (porosità, ritiri, cricche, ecc.)
- L'attrezzaggio può essere costoso
- La microstruttura ottenibile non è quella ottimale
- Sono richieste post-lavorazioni (distaffaggio, pulitura dal materiale di formatura, ecc.)

Colata in terra (sand casting)



Colata in terra

Introduzione

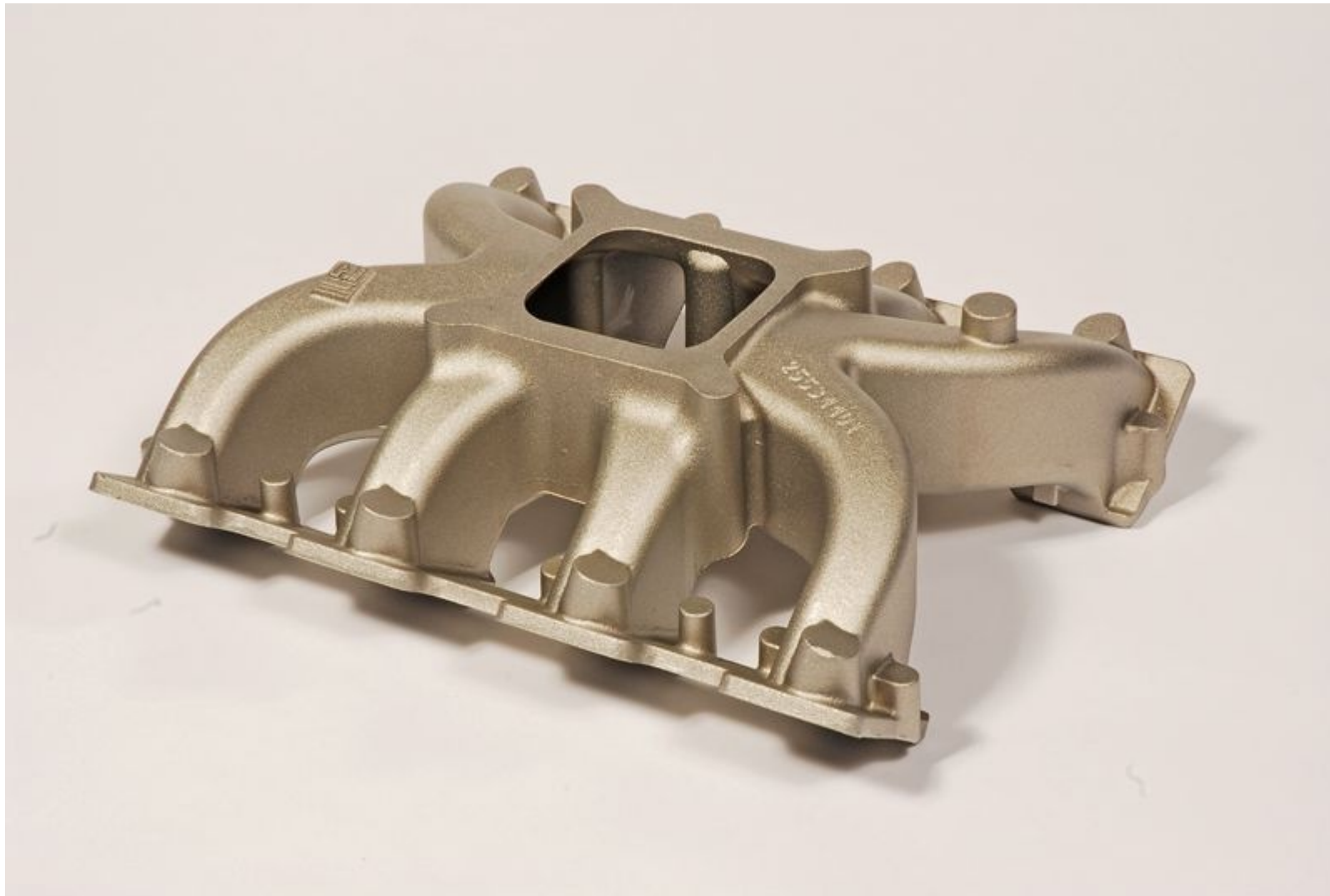
Il principio consiste nel preparare una cavità (**forma**) prodotta con un certo materiale (**terra da fonderia**) che ricalchi, al negativo, il pezzo che si intende produrre, la quale viene riempita con la lega costituente il pezzo portata allo stato fuso.

A solidificazione avvenuta il getto viene estratto mediante distruzione della forma.

E' una tecnica tradizionale, molto utilizzata e molto matura. Ecco alcune caratteristiche:

- ▶ Dimensione dei getti: MEDIA / MOLTO GRANDE
- ▶ Produttività: MEDIA / BASSA (in funzione del grado di automazione)
- ▶ Qualità del greggio: MEDIA / SCARSA (finitura, difettosità)
- ▶ Costo della forma: BASSO (nelle produzioni di serie)
- ▶ Versatilità: ELEVATA

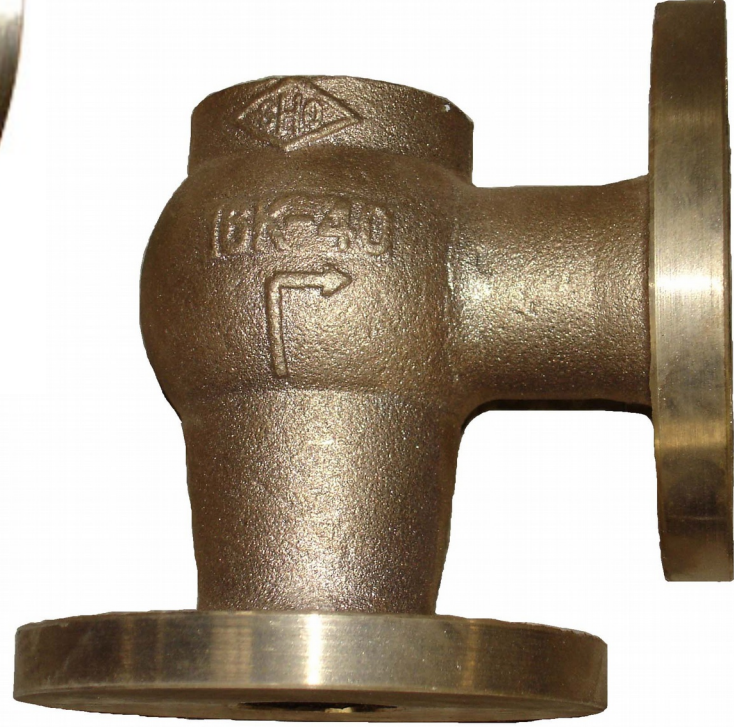
Colata in terra



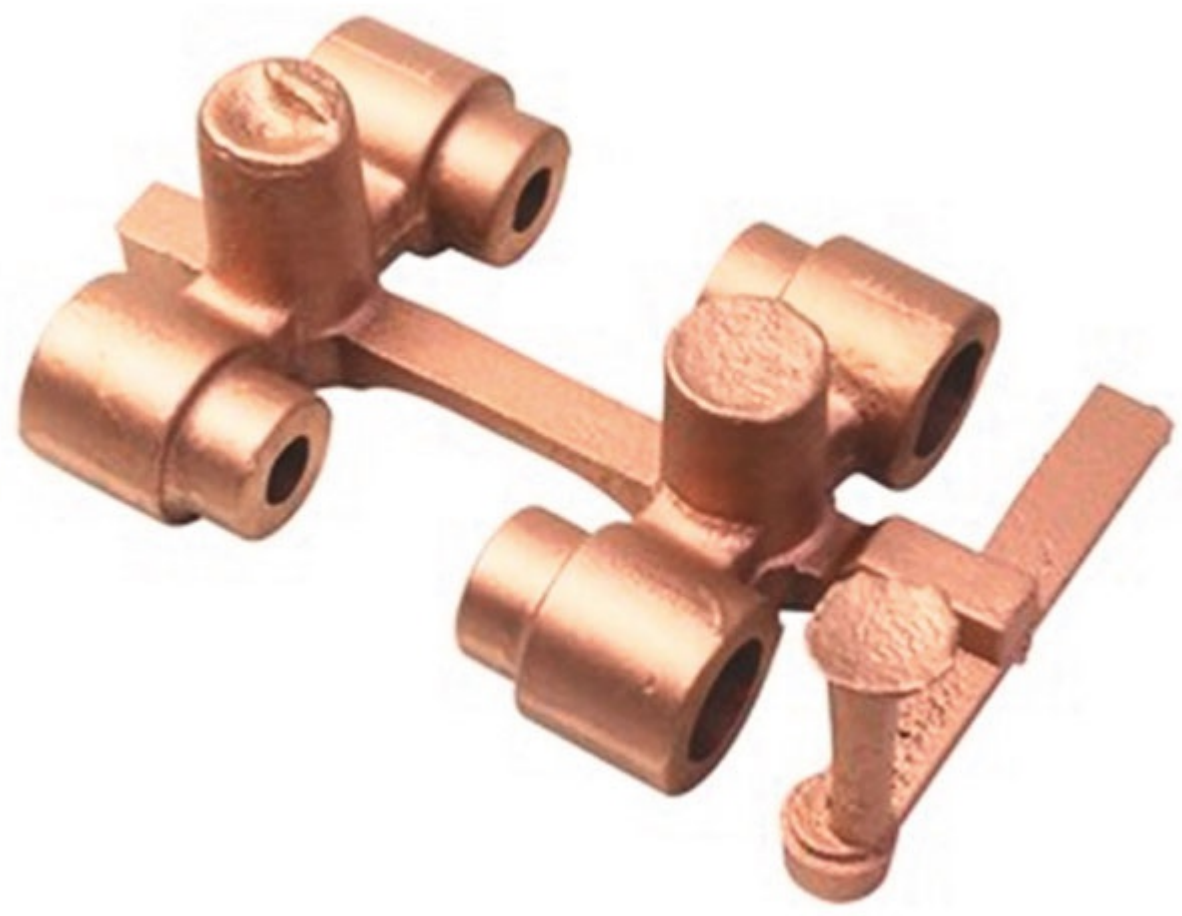
Colata in terra



Colata in terra



Colata in terra



Colata in terra



Colata in terra

Introduzione

Il principio consiste nel preparare una cavità (**forma**) prodotta con un certo materiale (**terra da fonderia**) che ricalchi, al negativo, il pezzo che si intende produrre, la quale viene riempita con la lega costituente il pezzo portata allo stato fuso.

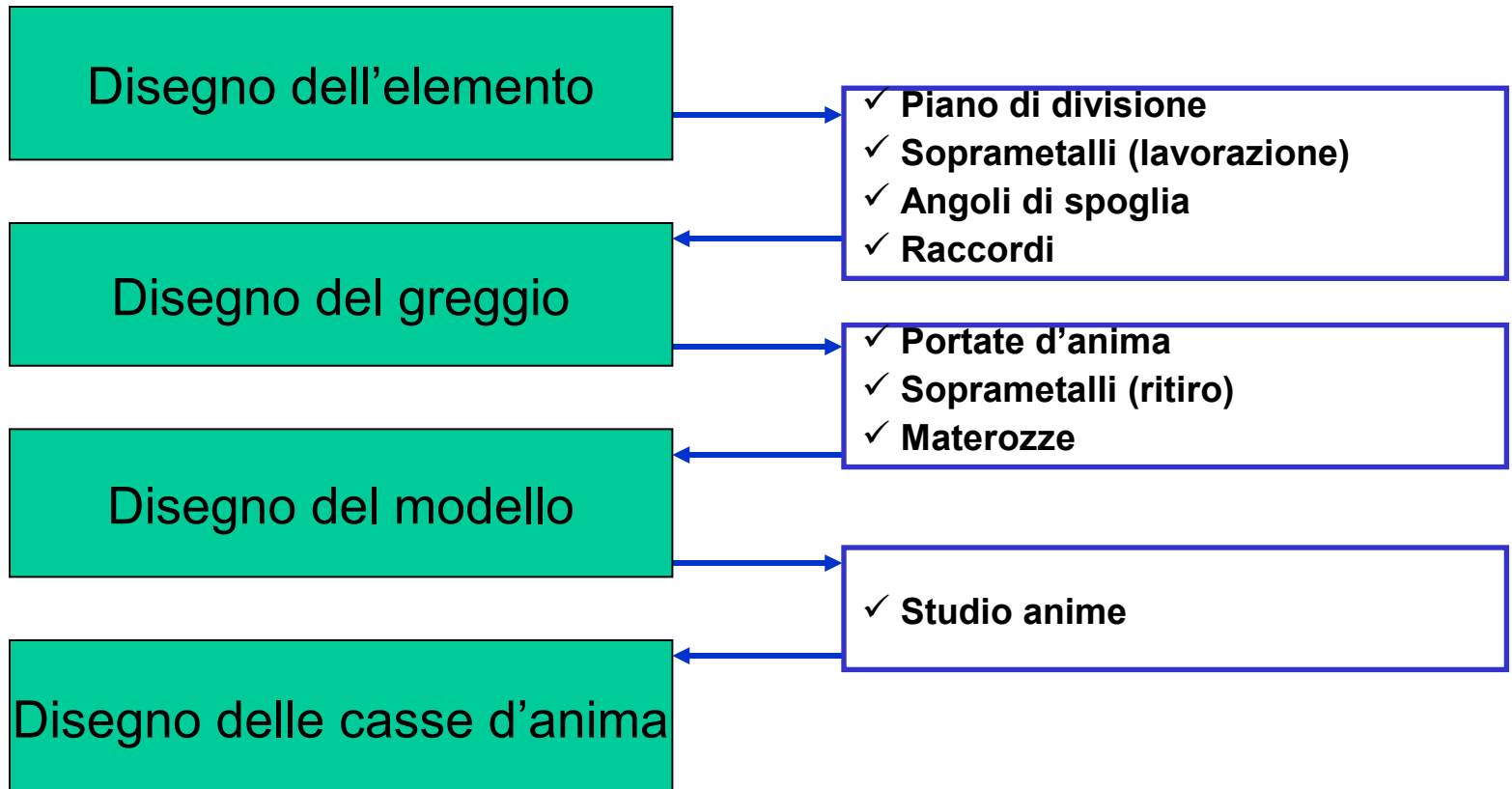
A solidificazione avvenuta il getto viene estratto mediante distruzione della forma.

E' una tecnica tradizionale, molto utilizzata e molto matura. Ecco alcune caratteristiche:

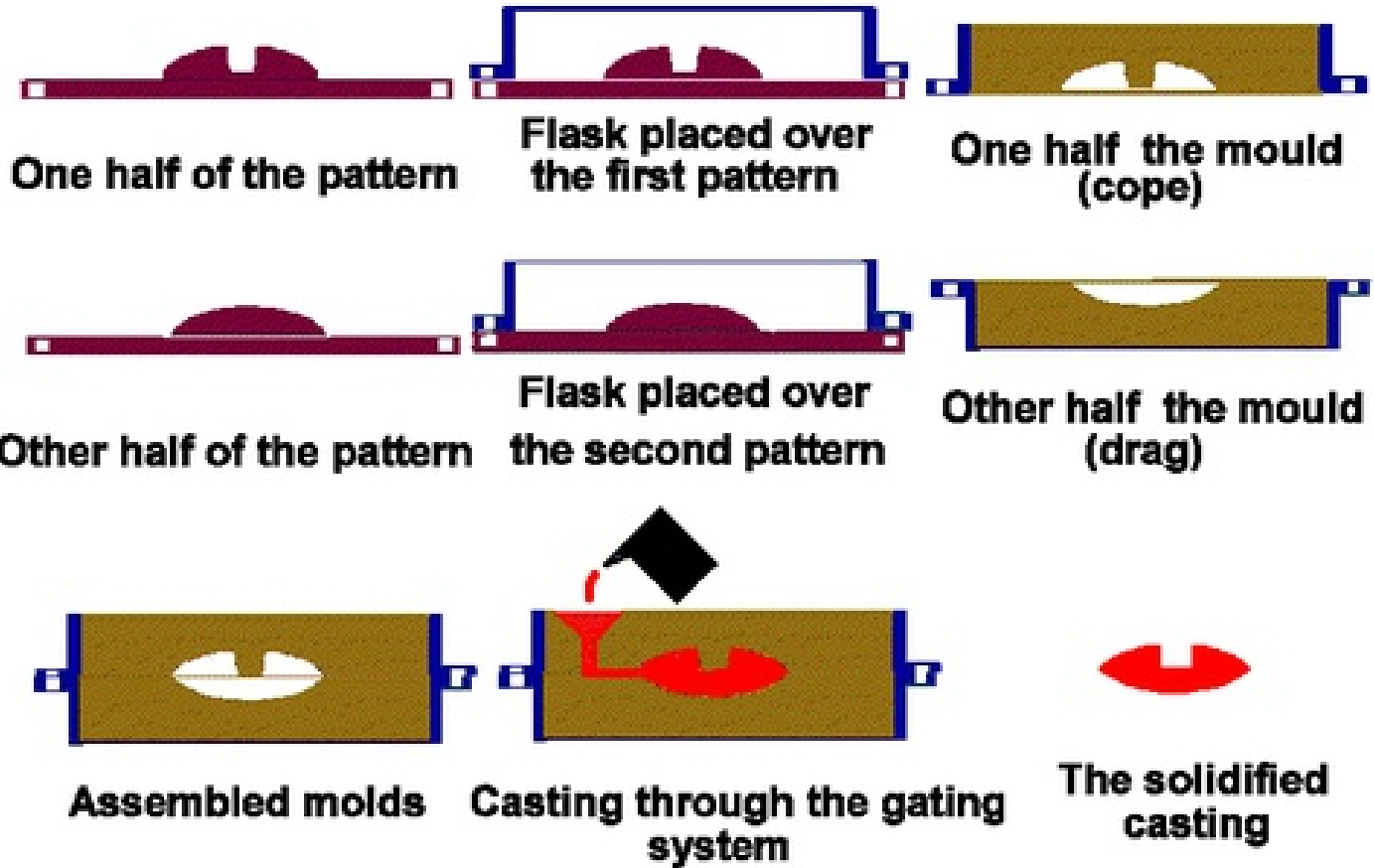
- ▶ Dimensione dei getti: MEDIA / MOLTO GRANDE
- ▶ Produttività: MEDIA / BASSA (in funzione del grado di automazione)
- ▶ Qualità del greggio: MEDIA / SCARSA (finitura, difettosità)
- ▶ Costo della forma: BASSO (nelle produzioni di serie)
- ▶ Versatilità: ELEVATA

Modello: progettazione

La fase di progettazione del **modello** necessario per preparare la forma a partire dal disegno finito dell'elemento che si intende produrre è riassunta nel diagramma seguente (vedi esercizio per dettagli):



Piano di divisione



Piano di divisione

Piano di divisione

La forma viene realizzata compattando, attorno al modello, un opportuno materiale da formatura entro dei contenitori di dimensioni normalizzate (UNI 6774, UNI EN 10025, UNI 3158, UNI 4544), denominati **staffe** o, per i getti di maggiori dimensioni entro cavità praticate nel pavimento stesso della fonderia (colata **allo scoperto**) o utilizzando un'impronta praticata nel pavimento completata da una staffa posta nella parte superiore (**colata in fossa**).

Per poter estrarre il modello dalla forma senza danneggiarla, esso deve essere, in genere, scomponibile. In pratica, nella maggior parte dei casi, esso viene diviso in due parti da un piano detto **piano di divisione delle staffe** (in quanto le due metà vengono utilizzate per produrre due semiforme contenute in una staffa superiore ed una inferiore).

Il modello (o i semimodelli) possono essere **liberi** o fissato su una **placca modello**, ovvero una piastra, generalmente metallica, sulle cui facce sono ricavate o fissate le due metà del modello stesso. Tale pratica risulta vantaggiosa in vista di un'automatizzazione delle operazioni.

Piano di divisione

Le parti del modello che non permetterebbero l'estrazione dello stesso dalla forma sono dette **sottosquadri** e la scelta del piano di divisione deve essere effettuata in modo da evitarli (soluzione dei sottosquadri).

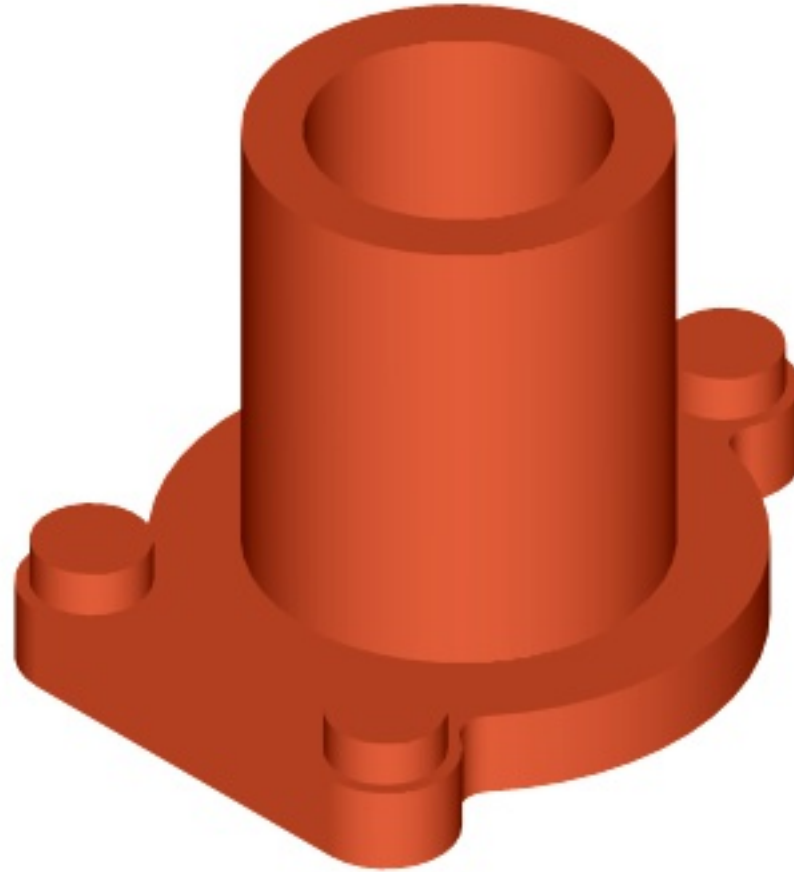
La soluzione a questo problema può essere ricercata con metodi euristici nel caso di modelli semplici o anche avvalendosi di software opportunamente progettati.

Se il problema non è risolvibile è necessario ricorrere ad uno dei metodi seguenti (in ordine di costo crescente):

- Modifica del progetto (il progettista dovrebbe tenere conto delle esigenze di produzione!) ⇒ possibili ulteriori problemi tecnologici.
- Uso di tasselli (molto utilizzato grazie ai moderni metodi di produzione delle anime).
- Uso di modelli scomponibili. E' un metodo costoso soprattutto perché richiede delicate operazioni manuali di estrazione delle parti mobili.

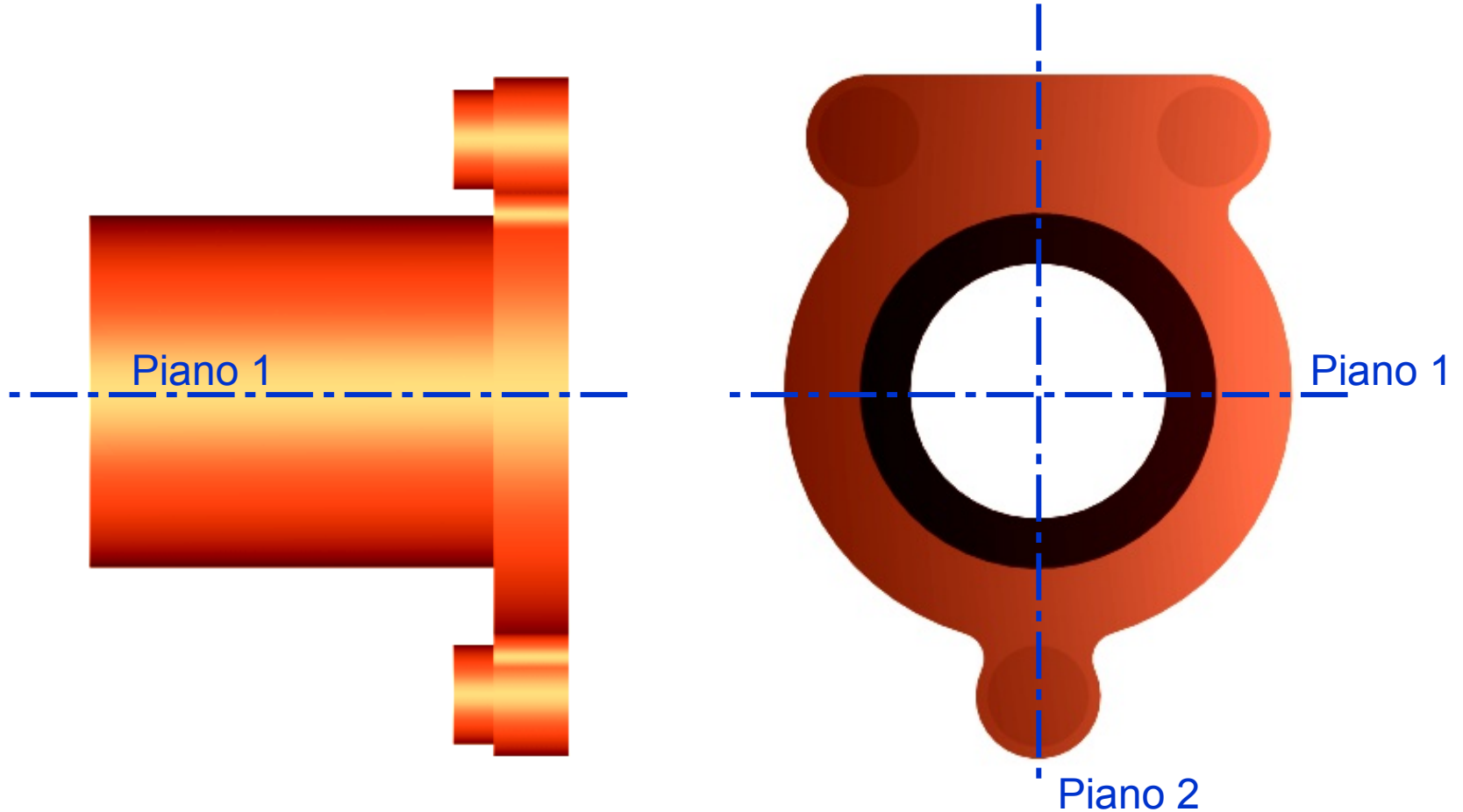
Piano di divisione

Esempio di problema di scelta del piano di divisione:



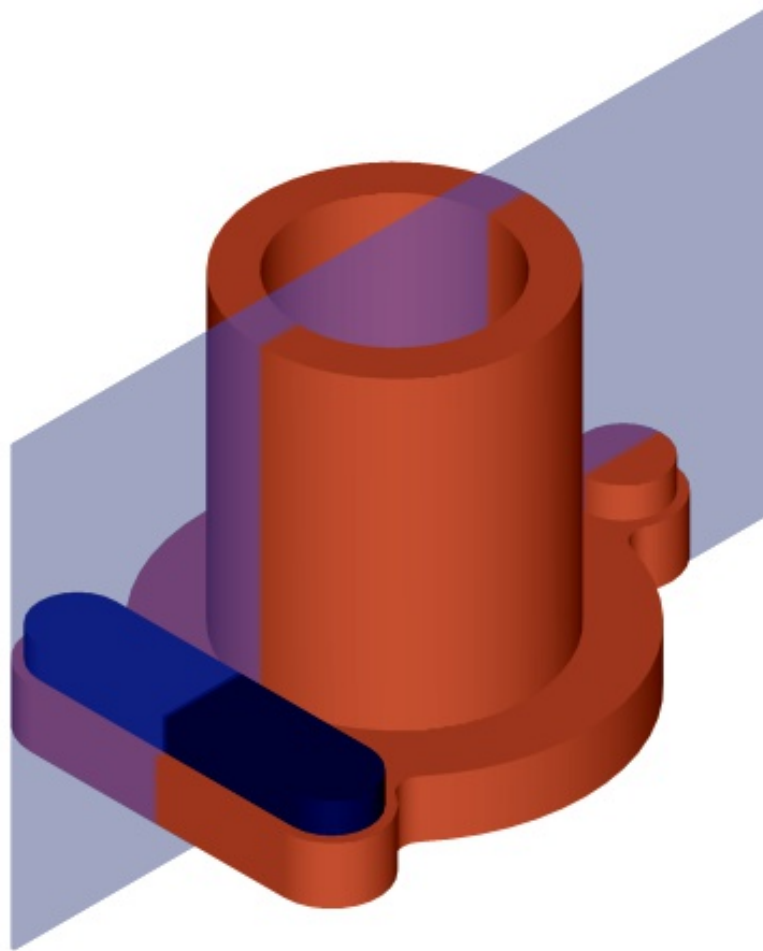
Piano di divisione

Esempio di problema di scelta del piano di divisione:



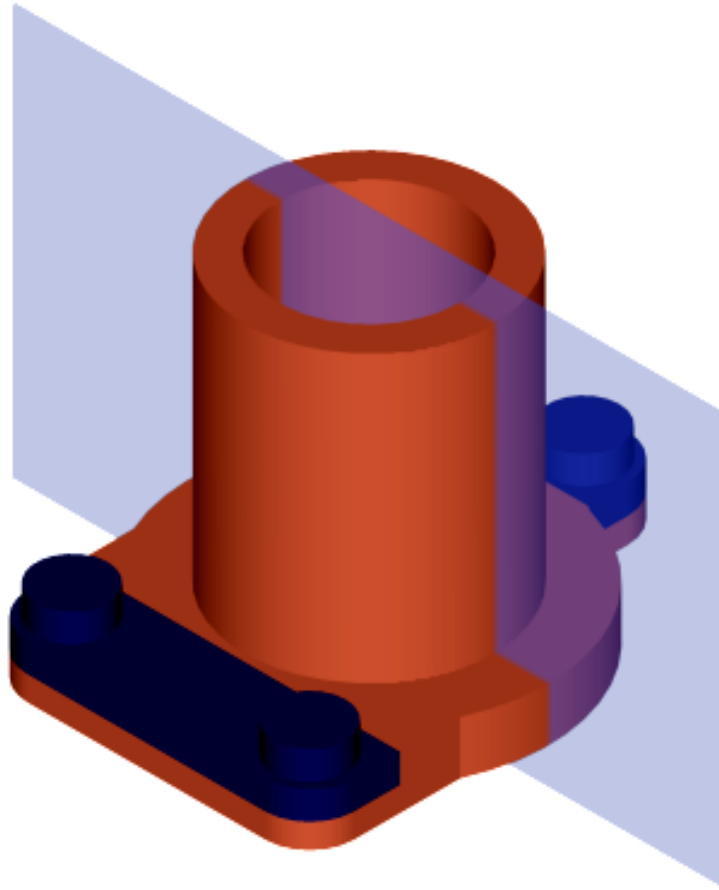
Piano di divisione

Esempio di soluzioni al precedente problema di risoluzione dei sottosquadri mediante modifiche al progetto.



Piano di divisione

Esempio di soluzioni al precedente problema di risoluzione dei sottosquadri mediante uso di inserti (modello scomponibile).



Soprametalli

Soprametalli nel greggio

La finitura superficiale (macro e micro) ottenibile mediante i procedimenti di fusione in terra non è generalmente sufficiente per soddisfare tutte le esigenze funzionali di progetto \Rightarrow lavorazioni per asportazione di truciolo. Vi sono delle contrastanti esigenze di economicità (tempo di rilavorazione, sprechi di metallo ed energia, ecc.) e di sicurezza nei confronti di errori di formatura e ritiri di difficile previsione, per cui il calcolo va impostato in quest'ottica (esistono anche delle tabelle orientative).

Spesso l'uso di sovrametalli è di tipo funzionale (per favorire ad esempio una solidificazione direzionale).

Talvolta si ricorre a sovrametalli per semplificare la geometria dei componenti (es.: fori, anime) o per risolvere sottosquadri: ciò può però complicare la situazione dal punto di vista, per esempio, delle cavità da ritiro.

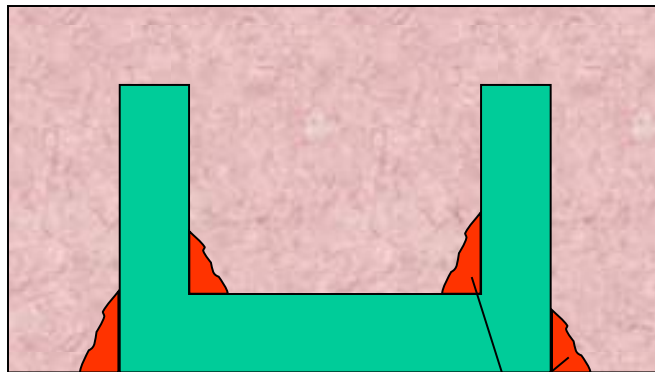
La valutazione dei sovrametalli va fatta ovviamente in funzione delle dimensioni del pezzo, del tipo di materiale, della finitura superficiale richiesta, della tecnica complessivamente impiegata.

Angoli di spoglia

Angoli di spoglia

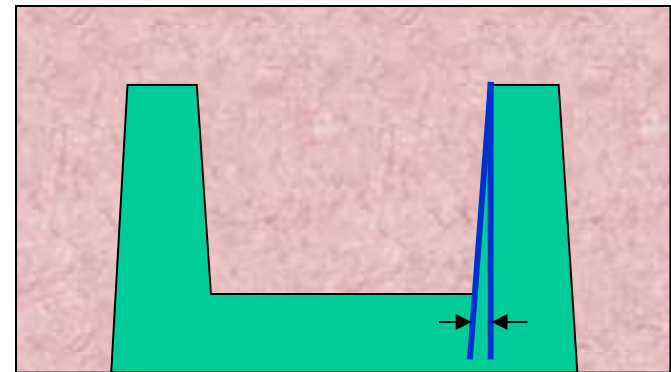
L'operazione di estrazione del modello dalla forma va eseguita in modo tal da non danneggiarla. A tale scopo è necessario dare una certa inclinazione (**spoglia o angolo di sforno**) alle pareti del modello perpendicolari al piano di divisione delle staffe. Il valore di tale angolo è riportato in tabelle in funzione dell'altezza della parete (angoli troppo grandi diventerebbero intollerabili per altezze troppo elevate).

L'angolo di spoglia può essere ridotto utilizzando modelli precisi, ben finiti e robusti (es.: modelli metallici), oppure mediante l'uso di lubrificanti.



Sforno

Terra trascinata



Angolo di sforno

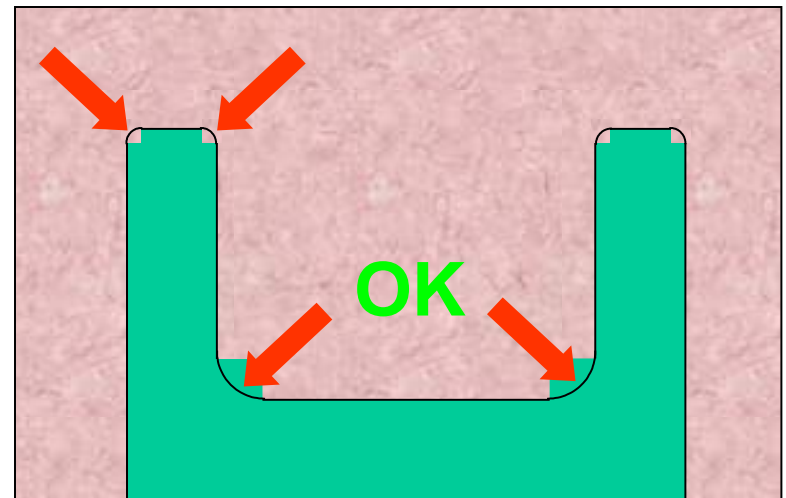
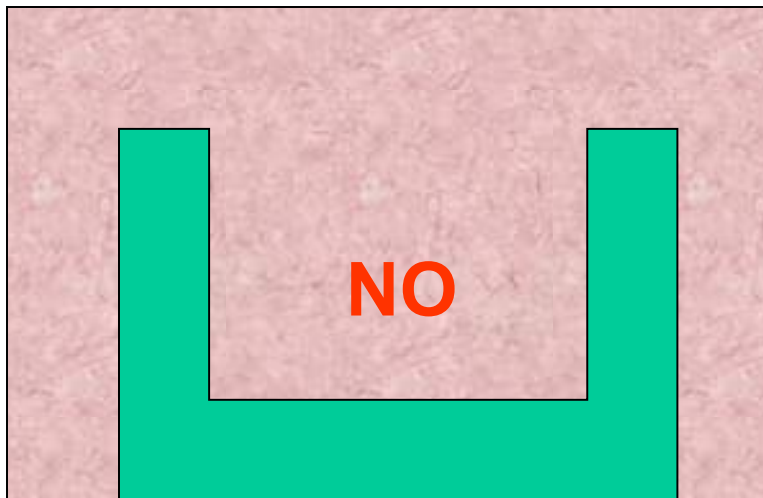
Raccordi

Raccordi

Gli spigoli vivi del modello (e quindi della forma) vanno sostituiti con opportuni raccordi, aventi le seguenti funzioni:

- 1) Evitare che l'azione erosiva del metallo fuso asporti parte del materiale degli spigoli, con la possibile formazione di inclusioni non metalliche
- 2) Ridurre la possibilità che si formino piani di frattura preferenziali in prossimità degli spigoli a causa della crescita direzionale dendritica in tali zone.

Le dimensioni consigliate dei raccordi sono riportate in apposite tabelle.



Portate d'anima

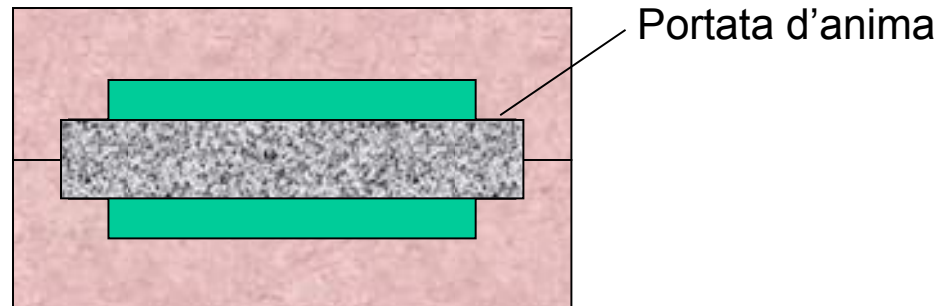
Portate d'anima

Le anime ed i tasselli sono elementi destinati a formare le cavità previste nel greggio ed a risolvere eventuali sottosquadri.

Tali elementi vanno alloggiati in opportune sedi (**portate d'anima**) previste nella forma:

- Anime orizzontali \Rightarrow sedi cilindriche
- Anime verticali \Rightarrow sedi troncoconiche (per centraggio)
- Anime e tasselli a sbalzo \Rightarrow attenzione alla posizione del baricentro!

Il dimensionamento delle portate d'anima va eseguito, in ogni caso, tenendo presente che anime e tasselli saranno sottoposti alla spinta metallostatica. Bisogna rimanere dunque sempre entro i limiti strutturali dei materiali di formatura utilizzati.



Ritiri

Ritiri

Il modello va dimensionato tenendo presenti i ritiri che avvengono durante le fasi di solidificazione. Essi possono essere classificati secondo lo schema seguente:

- Ritiri in fase liquida (dovuti al necessario *superheat*), legati al coefficiente di dilatazione termica del liquido
- Ritiri in fase di solidificazione, dovuti alla variazione di densità al cambiamento di stato ed ai coefficienti di dilatazione del liquido e del solido (la temperatura, infatti, può variare durante la solidificazione)
- Ritiri in fase solida, legati al coefficiente di dilatazione termica del solido.
- Ritiri dovuti ad eventuali cambiamenti di fase

Si rammenta inoltre che i valori dei coefficienti di dilatazione termica possono essere ritenuti costanti solo per piccole variazioni di temperatura.

In pratica si utilizza un **coefficiente di ritiro lineare medio**, tabellato in funzione del materiale considerato.

Materozze

Materozze

Le materozze sono cavità opportunamente previste allo scopo di contenere una certa quantità di riserva di metallo fuso destinato ad alimentare il getto in modo tale da compensare i ritiri ed evitare la formazione di cavità di solidificazione. Tali difetti comportano nella totalità dei casi lo scarto del pezzo prodotto.

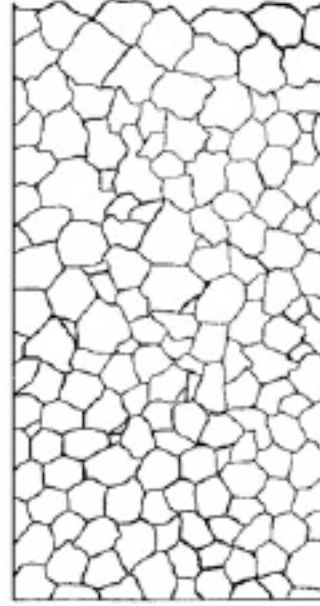
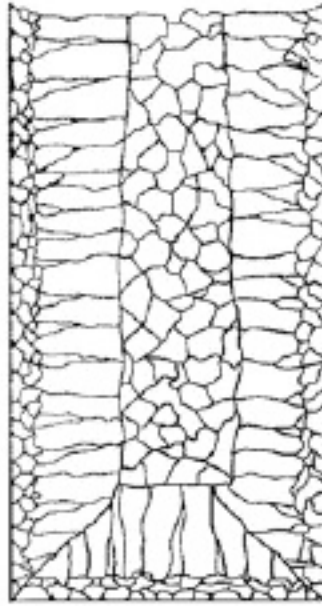
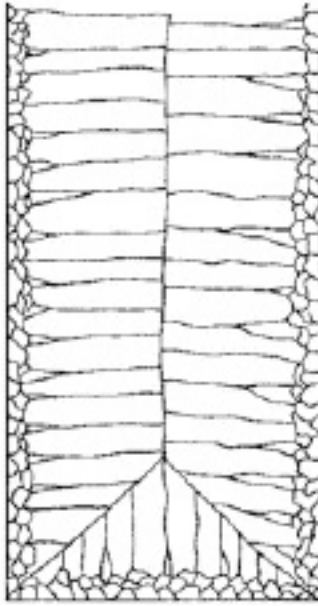
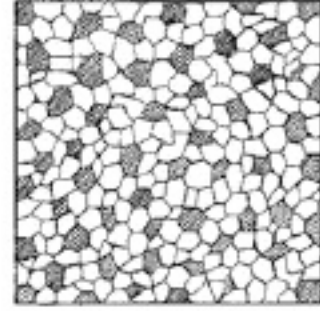
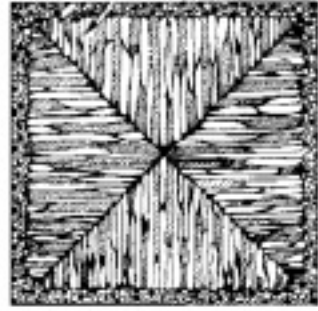
I fenomeni che avvengono durante la fase di solidificazione dovrebbero essere già noti dai corsi di Scienza e Tecnologia dei materiali. Riassumendo, ciò che è necessario sapere è che:

- La solidificazione avviene, per questioni di bilancio energetico, se è presente un certo sottoraffreddamento della massa liquida
- A parità di altre condizioni, la solidificazione eterogenea è energeticamente favorita rispetto a quella omogenea
- Per questi motivi, tenendo conto dell'andamento dei flussi termici e quindi dei gradienti di temperatura, si può spiegare il perché la solidificazione inizi sempre in prossimità delle pareti della forma

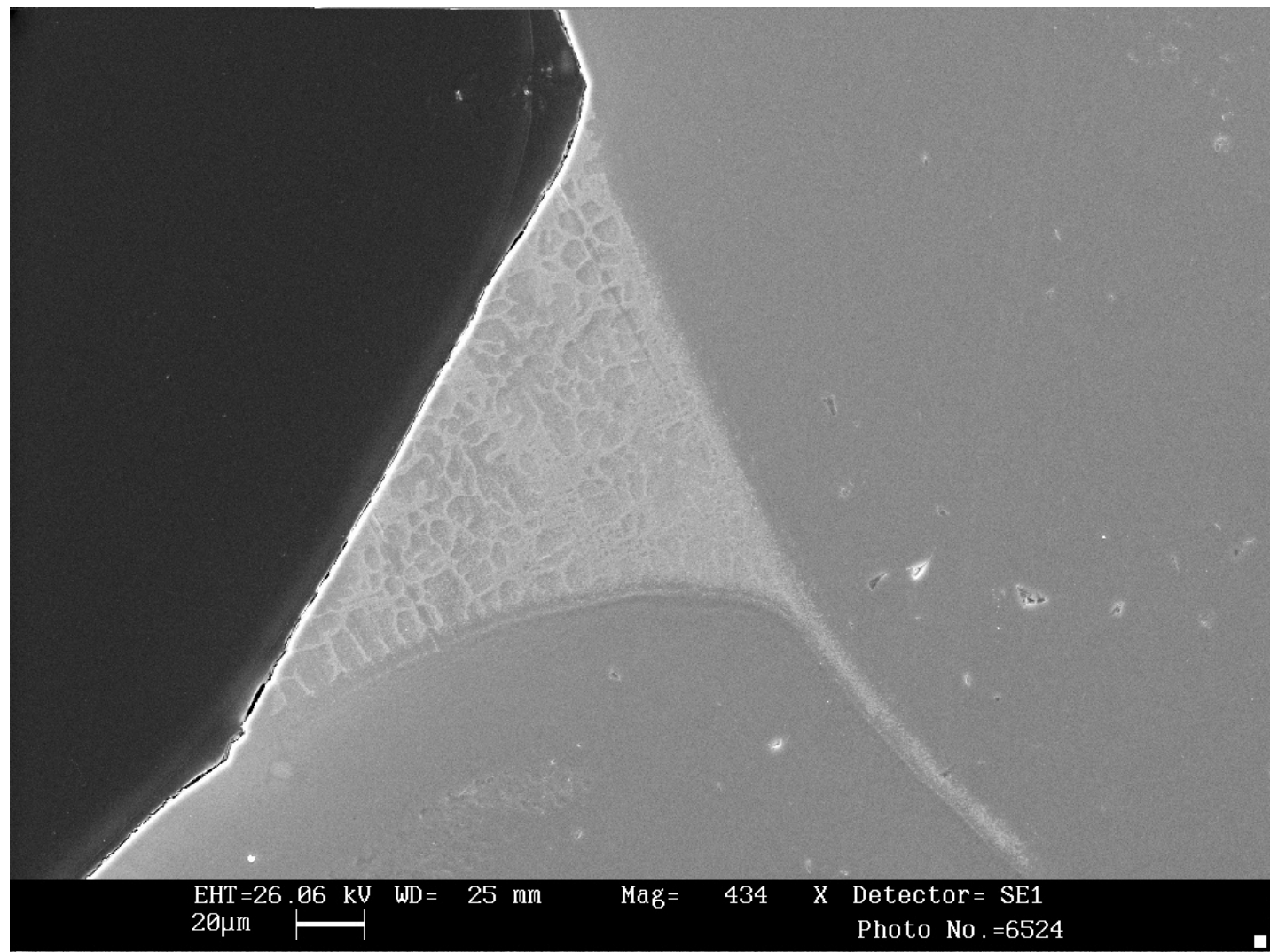
Materozze

- Il notevole sottoraffreddamento alla parete della forma spiega la presenza della zona di grano equiassico fine, in quanto viene favorito il processo di nucleazione.
- L'interfaccia solido-liquido presenta fenomeni di instabilità legati solitamente a questioni composizionali (segregazione), il che spiega la presenza di strutture a forma di albero chiamate dendriti orientate prevalentemente nella direzione del flusso termico.
- Il fatto che la solidificazione avvenga in maniera direzionale, unitamente alla presenza di fenomeni di ritiro allo stato solido e liquido, spiega la formazione del cono di ritiro.

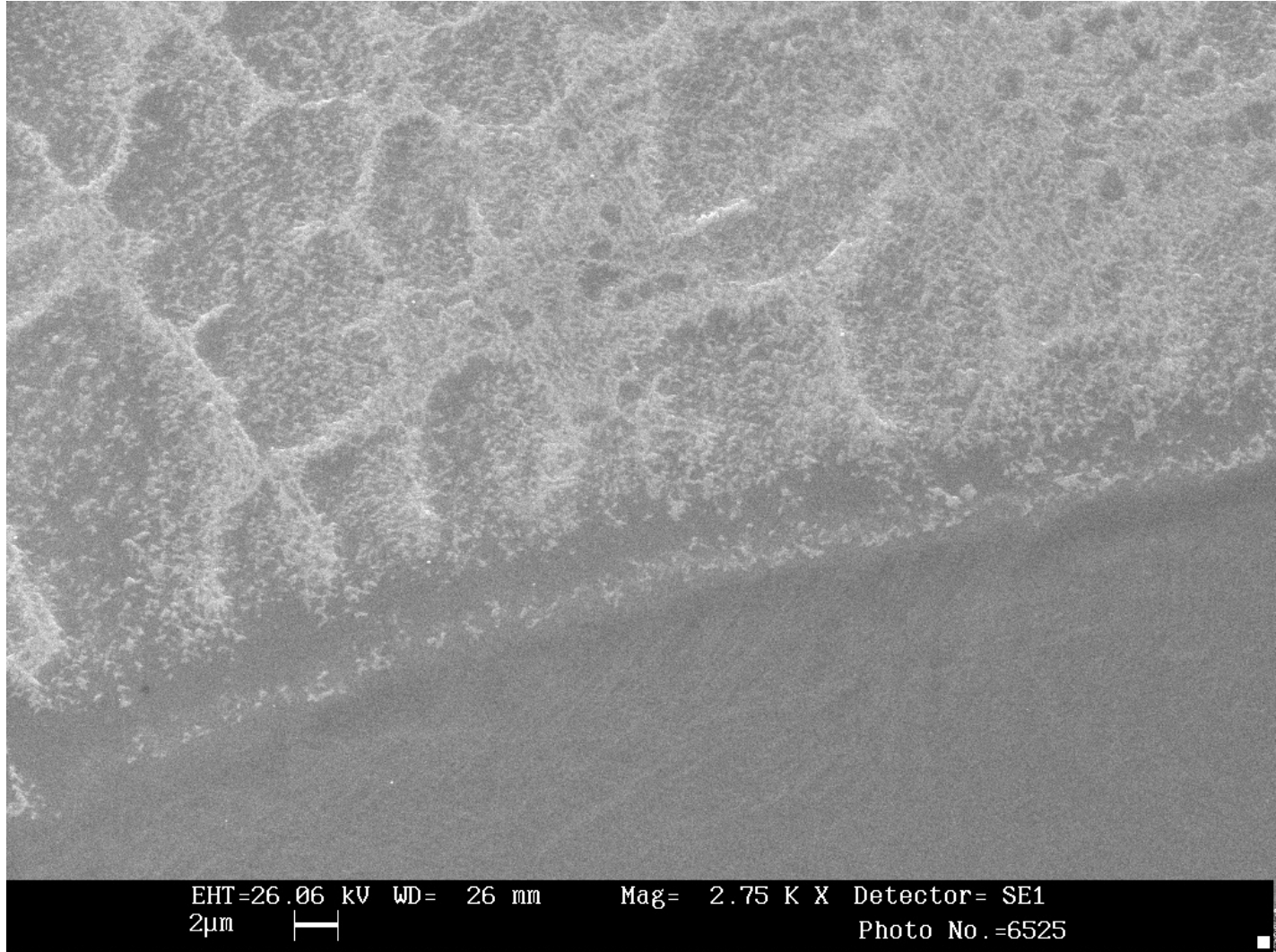
Materozze



Materozze



Materozze



Materozze

Il dimensionamento delle materozze richiede la conoscenza della velocità di solidificazione in ogni punto: esse vanno posizionate infatti nelle zone che solidificano per ultime, in quanto saranno quelle soggette alla presenza di coni di ritiro.

La risoluzione dei sistemi di equazioni che regolano questo fenomeno può essere di norma effettuata in maniera esatta solo per via numerica.

Sono tuttavia in uso dei metodi semplificati che fanno uso del cosiddetto **modulo di solidificazione**:

$$M = \frac{V_{\text{getto}}}{S_{\text{getto}}}$$

V_{getto} e S_{getto} sono rispettivamente volume e superficie del getto. Maggiore è M e maggiore è il tempo di solidificazione, come si può intuitivamente dedurre. Il valore di M può essere calcolato facilmente per molte geometrie semplici.

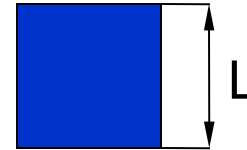
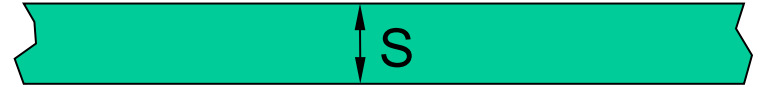
Materozze

Esempi:

M di una lastra piana $\infty = 0.5 * S$

M di un cubo = $L/6$

ecc.



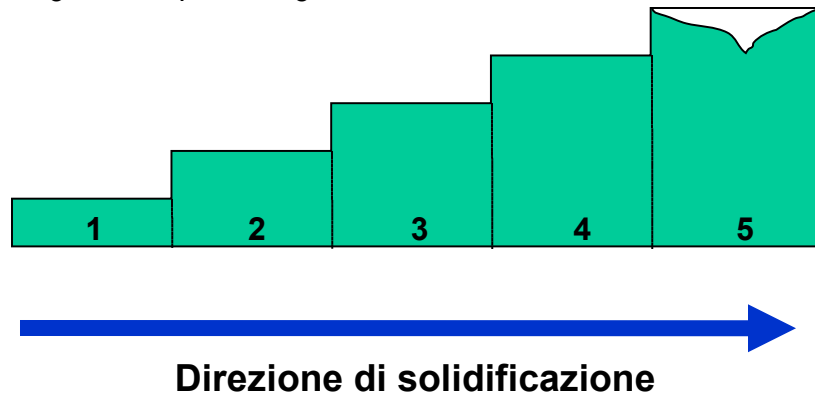
Si noti che nel calcolo non vengono considerate superfici di scambio termico quelle che non scambiano calore direttamente con la forma. Questa approssimazione presuppone quantomeno il fatto che il flusso termico sia in ogni punto normale alle superfici del getto: questa ipotesi è in genere abbastanza ben verificata poiché è buona norma mantenere gli spessori più bassi possibili per ottenere un getto sano.

Vi sono casi, tuttavia, in cui la componente non normale non può essere ragionevolmente trascurata, come, ad esempio, le zone di intersezione di nervature. In tal caso vi sono apposite regole empiriche che permettono di stimare un valore del modulo di raffreddamento equivalente.

Materozze

E' importante comprendere, a questo punto, il concetto di solidificazione direzionale, illustrato dalla figura seguente, in cui ogni gradino ha un M superiore a quello precedente. E' chiaro che il cono di ritiro si formerà nell'ultimo gradino, unico a non essere alimentato dal metallo liquido durante le fasi di solidificazione:

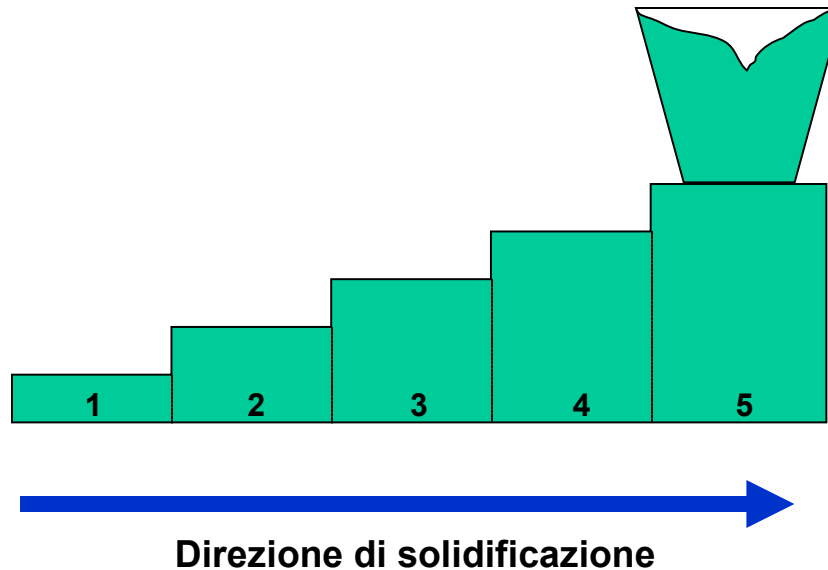
$$M_1 < M_2 < M_3 < M_4 < M_5$$



Materozze

Per evitare la formazione del difetto nell'ultima zona a solidificare, si usa porre in corrispondenza a tale zona una materozza: dopo avere "protetto" (se opportunamente dimensionata) il getto essa viene asportata.

$$M_1 < M_2 < M_3 < M_4 < M_5 < M_m \cong 1.2 * M_5$$



Materozze

Secondo le esperienze fatte, la solidificazione risulta certamente direzionale se la differenza nei moduli di raffreddamento di due sezioni consecutive del getto è di almeno il 10%, ovvero:

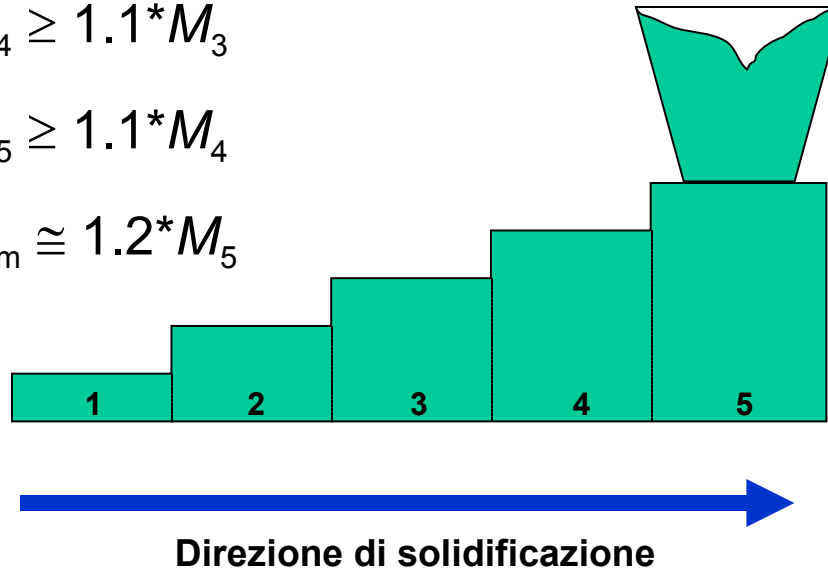
$$M_2 \geq 1.1 * M_1$$

$$M_3 \geq 1.1 * M_2$$

$$M_4 \geq 1.1 * M_3$$

$$M_5 \geq 1.1 * M_4$$

$$M_m \cong 1.2 * M_5$$



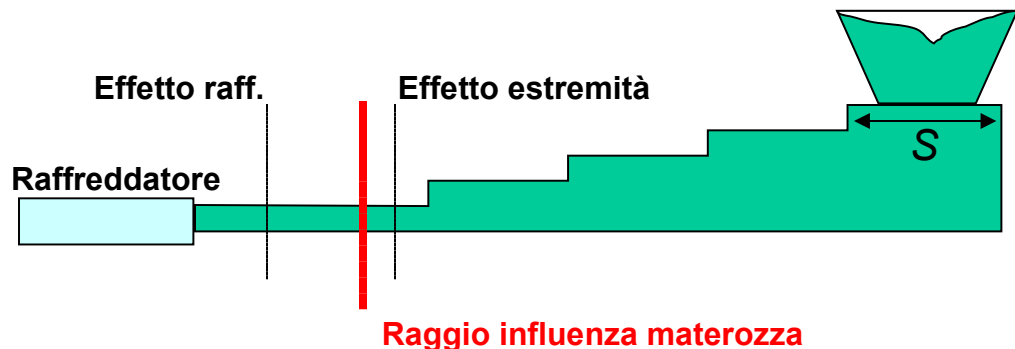
Materozze

In getti complessi o di notevoli dimensioni, pur in presenza di materozze, alcune zone del getto possono venire isolate dal contatto col metallo liquido durante la solidificazione: si attribuisce (in base a dati sperimentali) a ciascuna materozza la capacità di proteggere una zona detta **raggio di influenza** di dimensione R pari a:

$$R = k \cdot S$$

La costante k è tabellata e funzione del tipo di materiale. S è lo spessore medio del getto nella zona di attacco della materozza.

Vi è inoltre la possibilità, sempre nell'ottica di favorire la solidificazione direzionale, di inserire, in determinate zone, dei **raffreddatori**, costituiti generalmente da inserti metallici annegati nella forma.



Materozze

Il flusso del metallo dalla materozza nel getto è assicurato dall'azione della pressione atmosferica: è importante che questo sia assicurato, mediante l'uso di materiali porosi, anche nel caso di **materozze cieche** (ovvero annegate completamente nella forma).

Talvolta, al fine di favorire la permanenza di metallo liquido nella materozza, si usa porre in opera degli isolamenti termici o aggiungere polveri in grado di assicurare un effetto esotermico (es.: polvere di alluminio).

Per quanto riguarda la forma delle materozze, la migliore sarebbe quella sferica perché, a parità di volume, è il solido che presenta la minore superficie. Tuttavia, a causa di difficoltà realizzative si preferisce spesso impiegare forme emisferiche, cilindriche od ovali.

Materozze

Si noti che, durante la solidificazione avvengono dei fenomeni che contribuiscono a diminuire il modulo di solidificazione della materozza:

- 1) Apporto di metallo fuso al getto \Rightarrow calo di volume
- 2) Formazione del cono di ritiro \Rightarrow aumento della superficie di scambio

La valutazione di questa diminuzione di M può essere effettuata per via teorica e sperimentale ed è di poco inferiore al 20%: l'aver posto il valore di M_m a 1.2 volte quello del getto fa sì che, al termine della solidificazione i due moduli siano pressappoco uguali.

E' necessario inoltre che il cono di ritiro non raggiunga il getto: si pone per sicurezza che la sua profondità massima sia l'80% di quella della materozza. Partendo da questa assunzione si può stimare il **valore del massimo volume di getto alimentabile**, verifica che deve essere sempre eseguita perché il precedentemente citato criterio sul modulo prescinde dai problemi legati alla formazione del cono di ritiro.

Si può procedere stimando il volume del cono di ritiro V_r con la relazione seguente:

Materozze

Si può procedere stimando il volume del cono di ritiro V_r con la relazione seguente:

$$V_r = b \cdot (V_p + V_m)$$

dove:

b coefficiente medio di ritiro volumetrico (= ritiro percentuale/100)

V_p volume del getto

V_m volume della materozza

Rielaborando si ha:

$$V_p = \frac{V_r}{b} - V_m$$

Materozze

Da uno studio teorico del cono di ritiro in materozze di diverse geometrie si ha che, quando il cono di ritiro raggiunge il valore massimo previsto:

$$V_r = 0.14 \cdot V_m \quad (\text{materozze cilindriche e ovali})$$

$$V_r = 0.20 \cdot V_m \quad (\text{materozze emisferiche e sferiche})$$

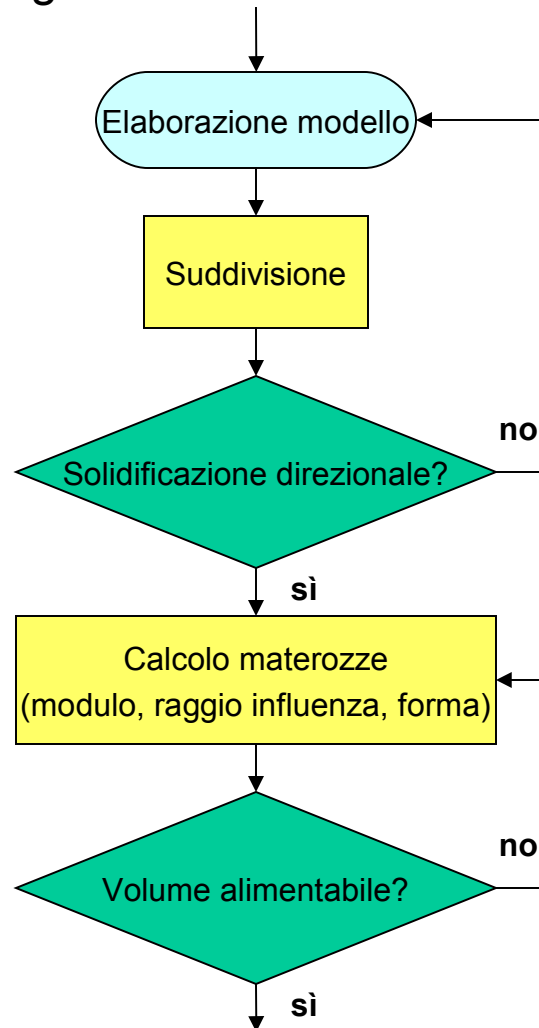
Sostituendo nell'equazione precedente si ha infine, nei due casi:

$$V_{p,\max} = \frac{0.14 \cdot V_m}{b} - V_m = V_m \cdot \left(\frac{0.14 - b}{b} \right)$$

$$V_{p,\max} = \frac{0.20 \cdot V_m}{b} - V_m = V_m \cdot \left(\frac{0.20 - b}{b} \right)$$

Materozze

Riassumendo, il dimensionamento delle materozze può essere effettuato secondo lo schema seguente:



Materozze

Si noti che le materozze sono poste in commercio come componenti pronti e di caratteristiche certificate dai rispettivi costruttori.

Un'ultima osservazione riguarda il **collare d'attacco** della materozza al pezzo. Esso deve soddisfare alcuni requisiti:

- 1) Non deve disturbare eccessivamente il flusso di metallo liquido né in esso il materiale deve solidificare precocemente.
- 2) Deve avere, compatibilmente con quanto detto al punto 1, la sezione minima possibile e deve essere posto preferibilmente su superfici piane, in modo da semplificare e ridurre i costi della lavorazione di asportazione.

Si osservi che, anche per i collari di attacco valgono le regole relative al modulo di solidificazione prima esposte, sebbene le dimensioni di tali componenti siano ormai largamente standardizzate.

Dispositivi di colata

Dispositivi di colata

La fase di progettazione successiva è quella dei **dispositivi di colata**, necessari per convogliare in modo adeguato il metallo fuso all'interno della forma, in modo tale che il getto risulti **sano**.

Poiché un dimensionamento basato su calcoli fluidodinamici risulta generalmente troppo oneroso, solitamente ci si basa su dati empirici ed, eventualmente, su prove ad hoc.

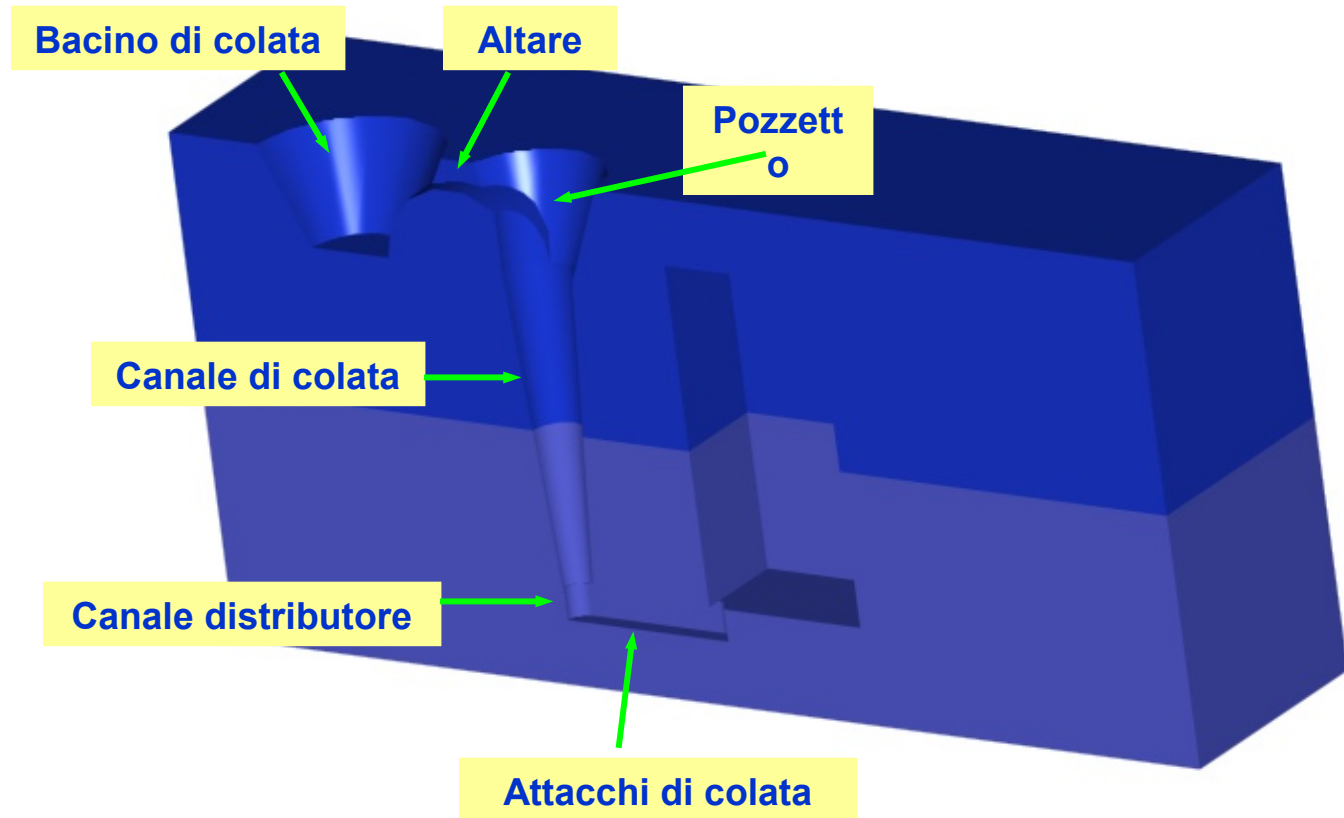
Alcune regole pratiche sono le seguenti:

- 1) La forma va riempita rapidamente (in funzione degli spessori), al fine di evitare solidificazioni premature
- 2) E' necessario evitare forti impatti, spruzzi, alte velocità della vena fluida, che comporterebbero la presenza di inclusioni, erosione, ecc.
- 3) Bisogna evitare che la loppa presente sulla superficie del metallo fuso, nel crogiolo, penetri nella forma
- 4) Bisogna evitare al metallo fuso percorsi lunghi e tortuosi, soprattutto se in presenza di piccoli spessori.

Dispositivi di colata

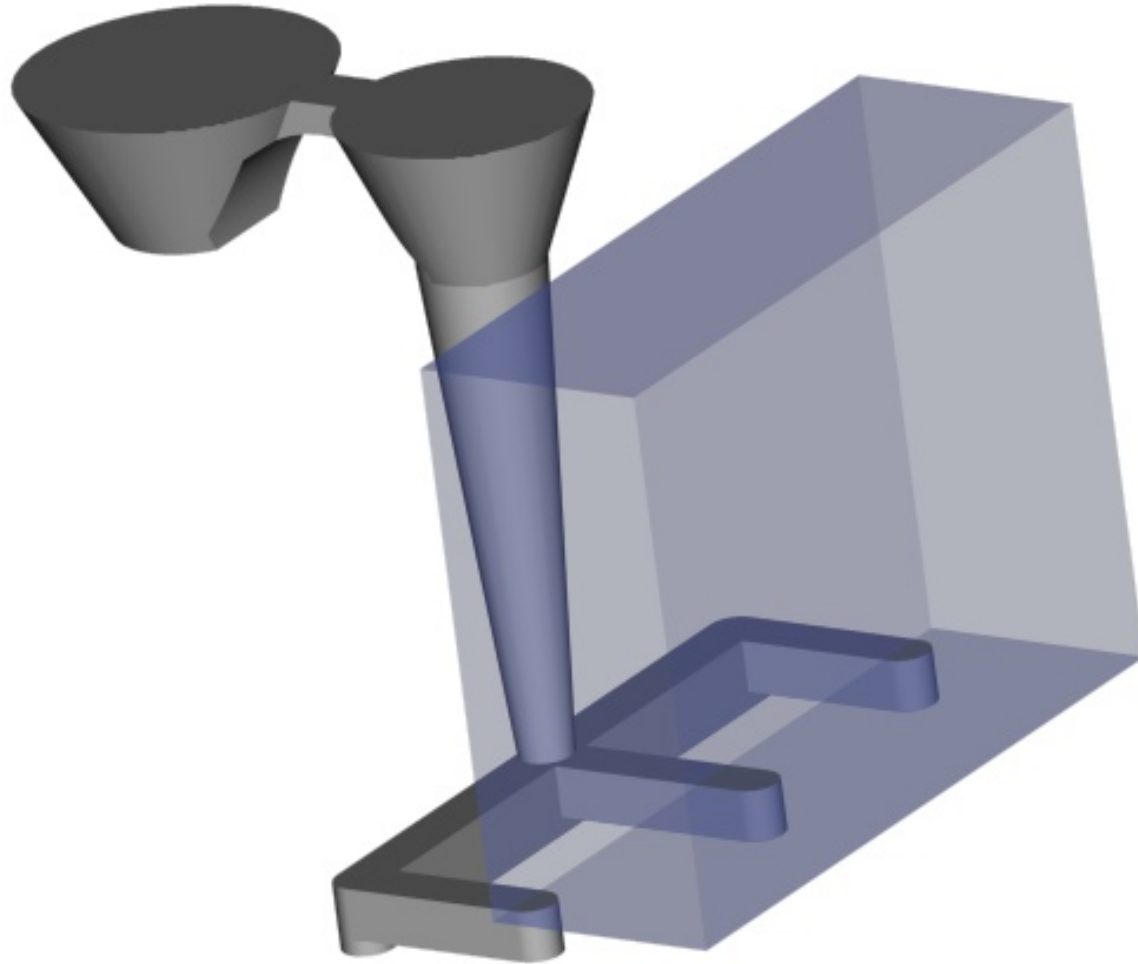
Spesso, per semplicità costruttiva, il sistema di colata si sviluppa principalmente sul piano di divisione delle staffe.

Esso è costituito, in una forma abbastanza comune, dai componenti rappresentati in figura.



Dispositivi di colata

Sistema di colata: rappresentazione solida.



Dispositivi di colata

Per evitare distacchi della vena liquida dalle pareti del sistema di colata, con conseguente pericolo di trascinamento di aria, viene comunemente adottato il sistema pressurizzato, il quale prevede i seguenti rapporti tra le sezioni dei vari componenti:

$$\begin{array}{c} \text{Canale di colata} : \text{Canale distributore} : \Sigma \text{ Attacchi} \\ \updownarrow \\ 4 : 3 : 2 \end{array}$$

Il dimensionamento delle sezioni si effettua a partire dal tempo di colata, valutato in diverse maniere, ma sempre allo scopo di ottenere un buon compromesso tra rapido riempimento della forma (per evitare premature solidificazioni ed esposizione della forma non bagnata all'irraggiamento da parte del metallo fuso) e contenimento dei fenomeni di erosione/spruzzo/trascinamento, ecc.

Dispositivi di colata

Il dimensionamento del sistema di colata deve essere eseguito in modo tale che il numero di Reynolds sia, in ogni punto, minore di un valore critico (ad es. 20.000): questa condizione permette in genere di evitare trascinati d'aria.

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

Per il calcolo delle velocità è utile ricorrere al teorema di Bernoulli ed all'equazione di continuità:

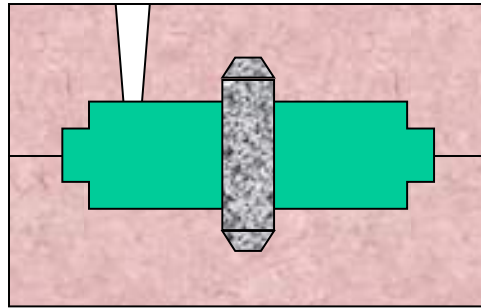
$$P_0 + \frac{\rho \cdot v_0^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_0 = P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 + f$$

$$A_0 \cdot v_0 = A_1 \cdot v_1$$

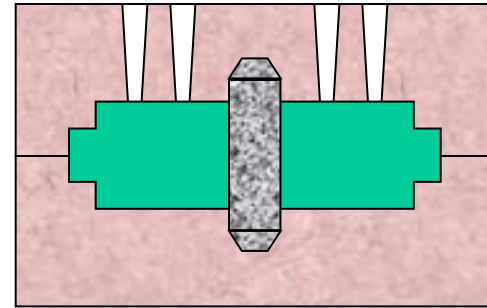
Il termine f rappresenta le perdite dovute ai fenomeni dissipativi (attrito).

Dispositivi di colata

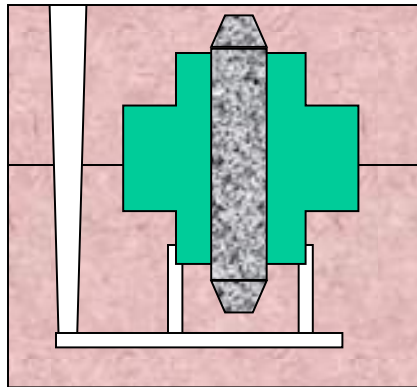
Vengono riportati nelle figure seguenti alcune strategie di alimentazione del metallo fuso comunemente adottate:



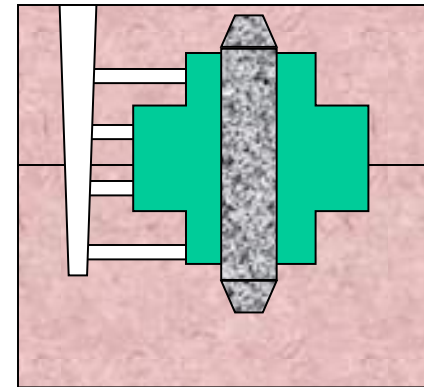
Diretta (o dall'alto)



A pioggia



In sorgente (o dal basso)



A pettine

Sabbie e terre da fonderia

Sabbie e terre per fonderia

Le terre per fonderia comprendono essenzialmente i seguenti elementi:

- 1) Refrattario granulare (SiO_2 , Cr_2O_3 , Al_2O_3)
- 2) Legante (argille, cemento portland, silicati idrosolubili, resine)
- 3) Additivi (plastificanti, distaccanti, additivi per anime, induritori e catalizzatori)

Le caratteristiche fondamentali sono le seguenti:

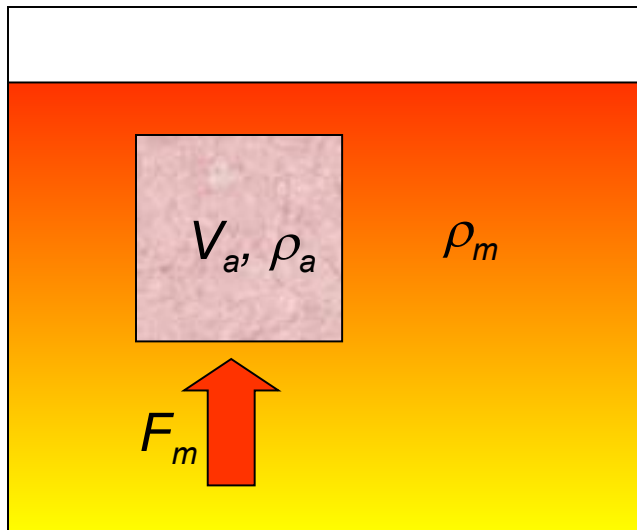
- Refrattarietà (il materiale non deve sinterizzare)
- Coesione
- Permeabilità ai gas
- Plasticità e scorrevolezza
- Sgretolabilità

Spinta metallostatica

Spinta metallostatica

Come verifica finale del lavoro di progettazione relativo ad un processo di fusione in terra, è necessario controllare che:

- 1) La spinta metallostatica non superi i limiti strutturali di anime e tasselli
- 2) La spinta metallostatica non sia in grado di sollevare la staffa superiore.
In questo caso sarà necessario disporre un certo numero di pesi atti a contrastare tale forza.



$$F_m = V_a \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_a)$$

Formatura con terra sintetica

Procedimento di formatura con terra sintetica

Il processo di formatura è meccanizzato e consiste in una compattazione della terra mediante vibrazione attuata sull'insieme placca-staffa-terra seguita da compressione meccanica. Segue la sformatura del modello in direzione perfettamente perpendicolare alla staffa ed, eventualmente, la separazione dalla staffa stessa (in tal caso la forma prende il nome di **motta**)

La terra sintetica viene preferita per la costanza delle caratteristiche tecnologiche.

La dimensione massima dei pezzi ottenibili è legata a quella delle staffe e delle macchine di formatura (un centinaio di kg è solitamente il limite pratico).

La terra, dopo l'utilizzo, può essere, previo opportuno trattamento di vagliatura e macinazione, parzialmente riutilizzata (70% nei casi migliori).

La produttività è bassa.

Formatura con silicati

Procedimento di formatura con silicato di sodio

Il legante è silicato di sodio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2$), sostanza solubile in acqua. Esso viene fatto reagire con CO_2 per dare carbonato di sodio e silice colloidale, la quale agisce da legante per la sabbia silicea, che viene aggiunta in proporzione del 3% circa in peso (lavata ed essiccata). E' necessario l'uso di additivi per migliorare la sgretolabilità della massa.

La produttività è elevata in quanto il processo è automatizzabile.

Le possibilità di recupero del materiale di formatura sono scarse.

Formatura con sabbia-cemento

Procedimento di formatura con miscele sabbia-cemento

Il legante è cemento portland, il quale, mescolato con opportune quantità di sabbia silicea, viene fatto reagire con acqua.

Tale sistema presenta, essendo la massa poco viscosa, il vantaggio di non richiedere compattazione meccanica, il che facilita, velocizza e permette di automatizzare le operazioni di formatura.

Alcuni svantaggi sono la relativamente bassa permeabilità ai gas, la scarsa possibilità di recupero del materiale di formatura, la difficoltà nello sgretolamento.

Formatura cold-box

Procedimento di formatura cold-box

Il legante è organico: si fa avvenire la reticolazione, a freddo, mediante l'azione di un catalizzatore (o indurente) gassoso.

Le caratteristiche di precisione e finitura superficiale sono buone, mentre generalmente scarsa o nulla è la possibilità di recupero del materiale di formatura.

Vi è inoltre il problema legato all'uso di reagenti tossici allo stato gassoso.

Formatura shell-molding

Procedimento di formatura shell-molding

In questo procedimento i grani di sabbia silicea sono rivestiti da un sottile strato di resina fenolica.

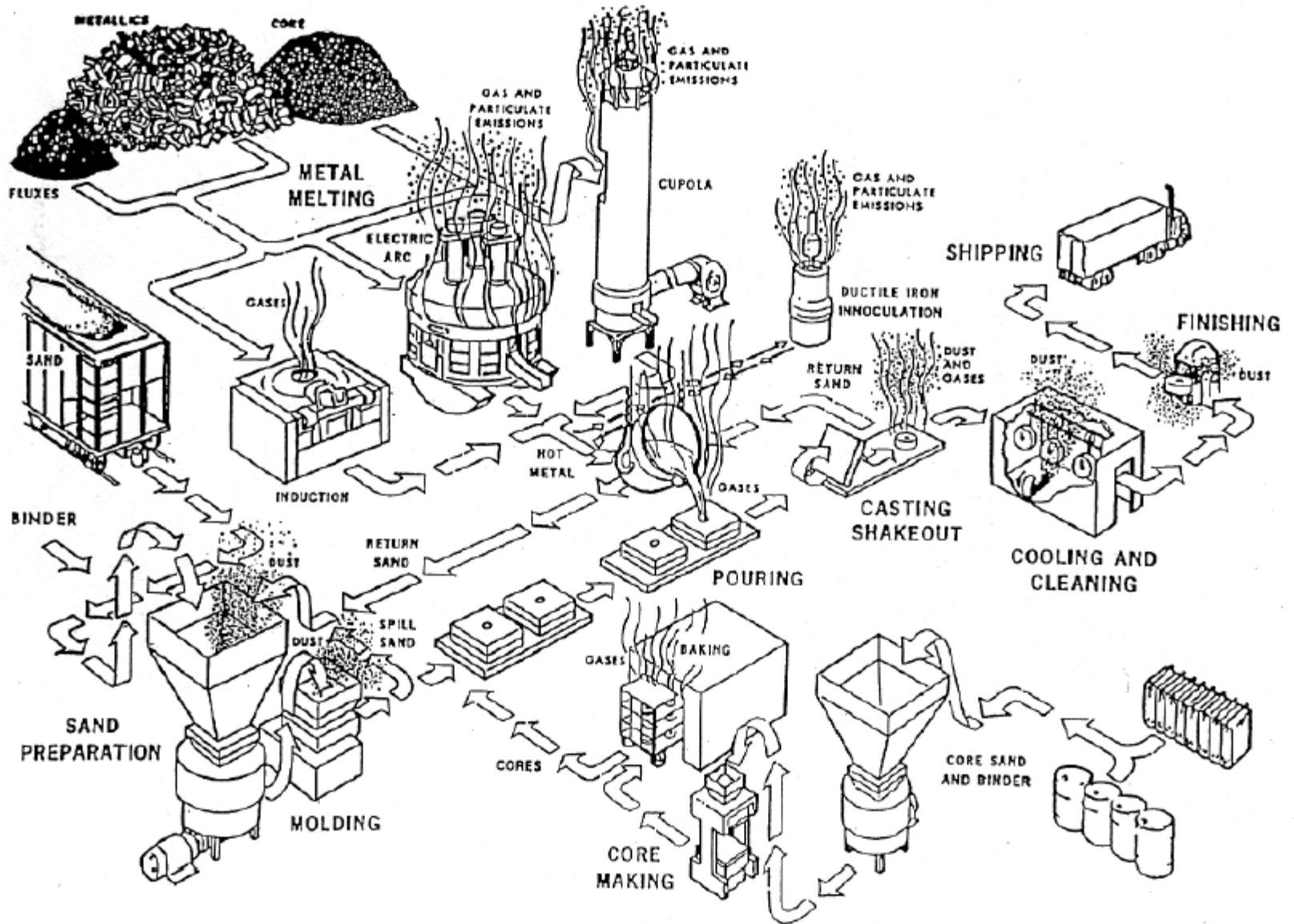
La placca modello e le casse d'anima metalliche vengono riscaldate intorno ai 250° C ed il materiale sopra descritto viene "sparato" contro la loro superficie mediante aria compressa. In questo modo la resina reticola e fa da legante.

Segue un procedimento di cottura attuato in modo tale che il materiale raggiunga le caratteristiche desiderate.

Ciò che si ottiene sono dei gusci spessi 20-30 mm che presentano ottime caratteristiche di permeabilità ai gas e di finitura superficiale.

Il metodo si presta egregiamente all'automazione ed alla produzione di grande serie (es.: anime per rubinetteria).

Layout di una fonderia



Microfusione

Fusione in guscio o microfusione

E' la versione moderna dell'antico metodo di fusione a cera persa.

La prima fase consiste nella preparazione di un certo numero di copie del un modello in cera o, più frequentemente, in materiali equivalenti (polistirene, ecc.). Per la descrizione completa, si rimanda alla figura della pagina seguente.

In questo procedimento la presenza di sottosquadri nel modello non costituisce un problema, né è necessario l'uso di anime o accorgimenti simili.

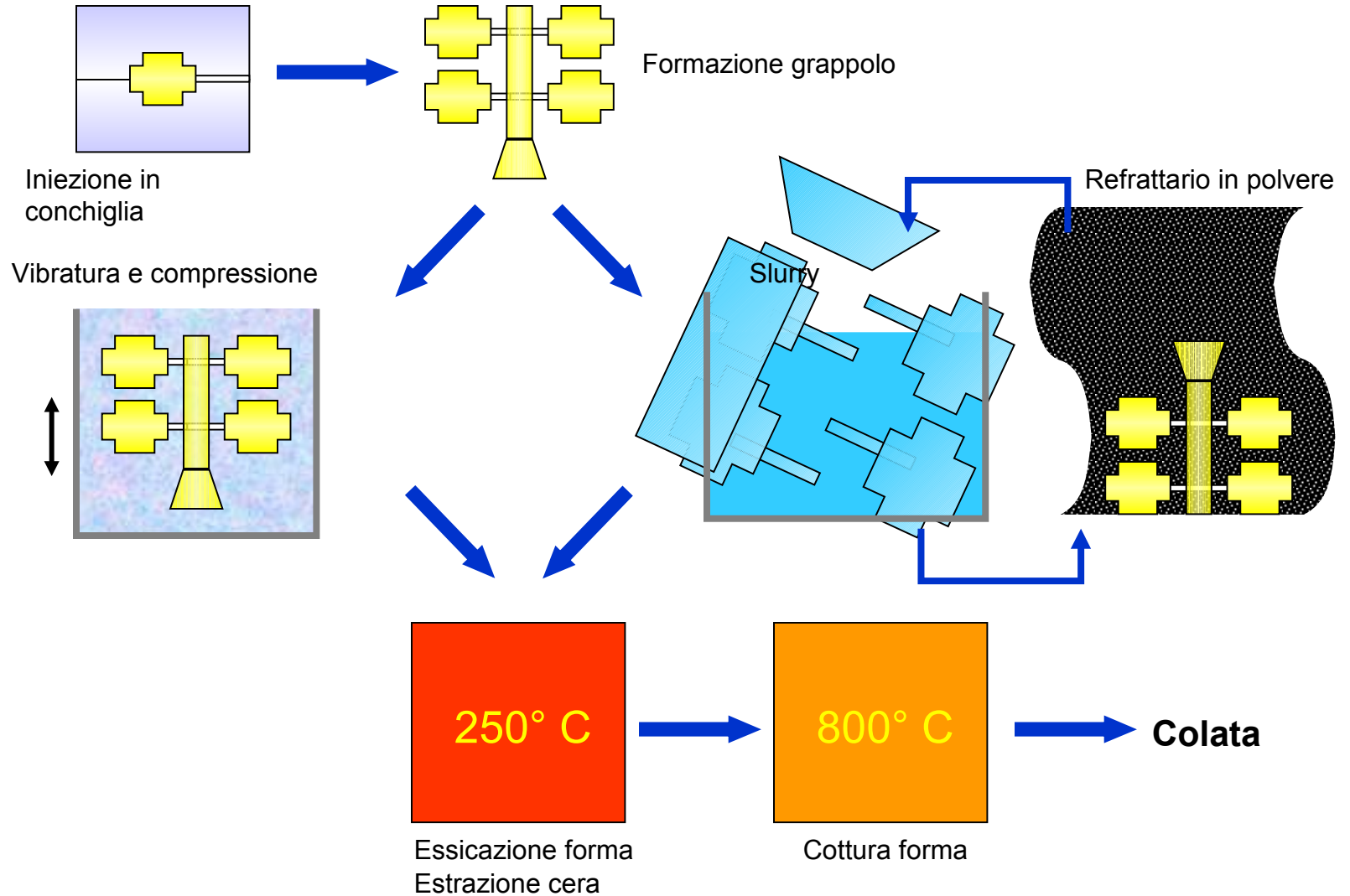
Il processo è limitato a pezzi di piccole dimensioni, ma presenta il vantaggio di un'ottima finitura superficiale e tolleranza dimensionale.

I sovrametalli richiesti sono minimi (tipicamente decimi di mm), come pure gli spessori riproducibili (per materiali in cui la viscosità del fuso non sia elevata si possono ottenere anche spessori inferiori al mm).

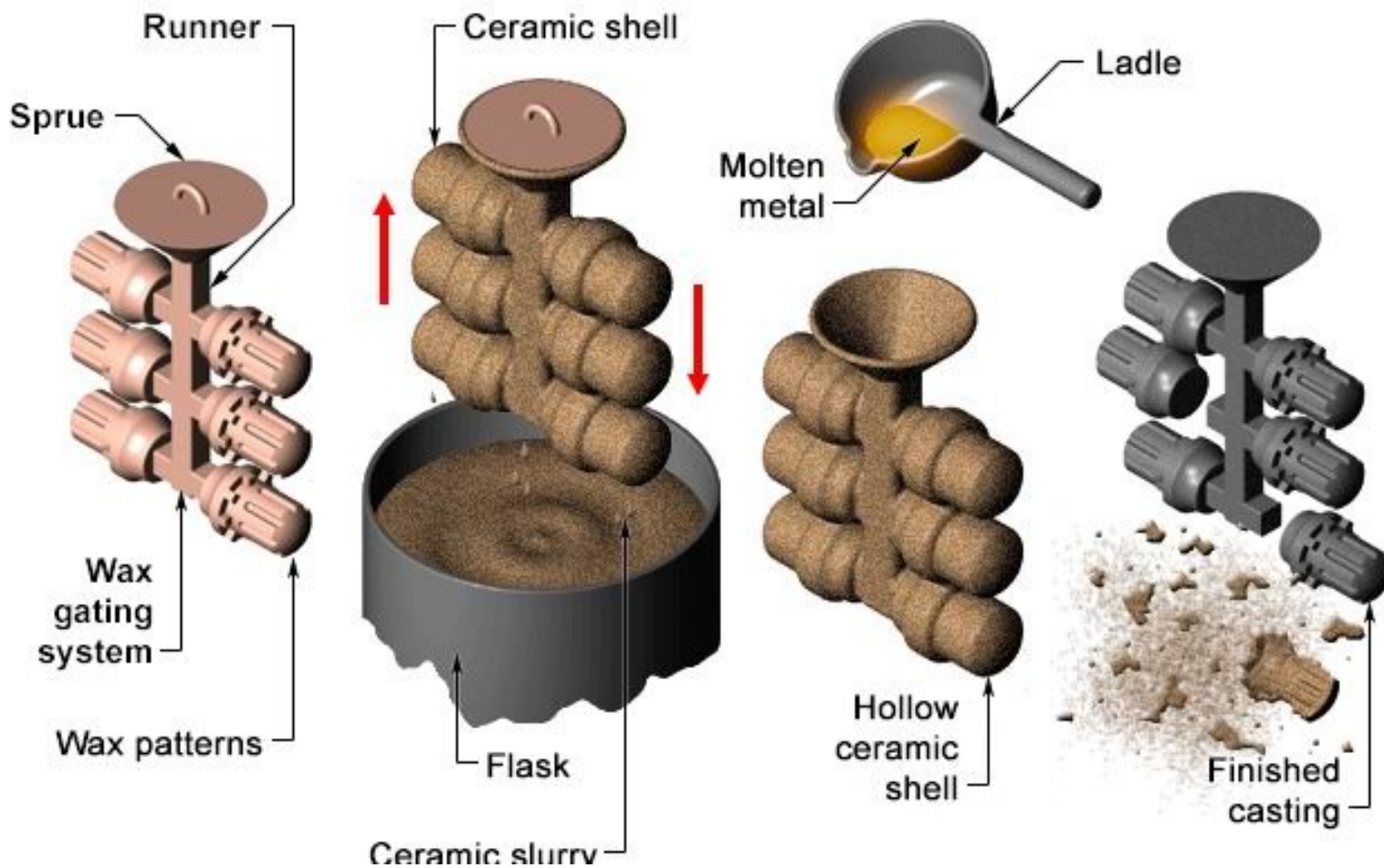
La produttività è bassa ed il procedimento è costoso e destinato ad oggetti ad alto valore aggiunto (campo della gioielleria, dell'odontotecnica, ecc.).

Microfusione

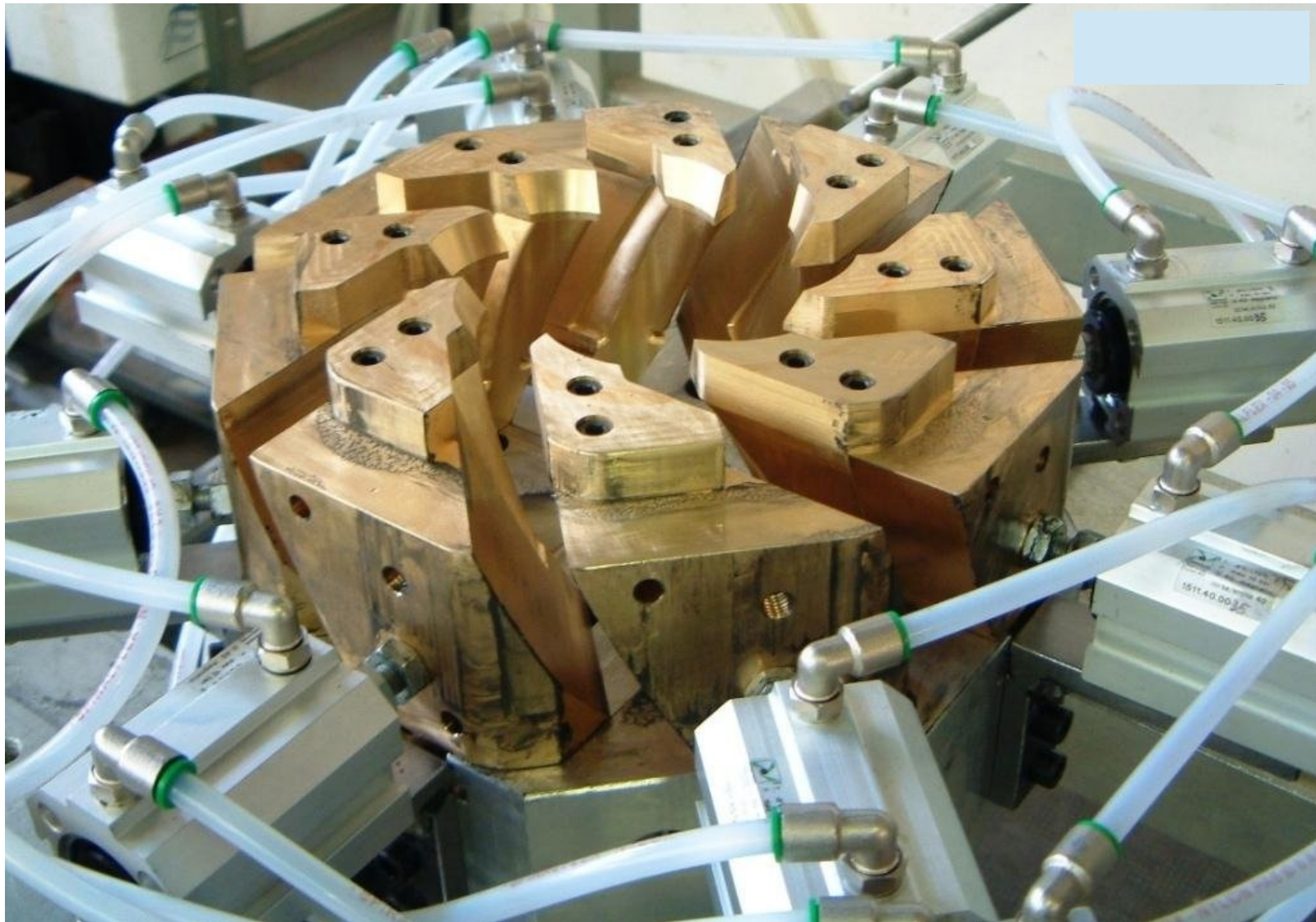
Ciclo tecnologico del procedimento di microfusione:



Microfusione



Microfusione



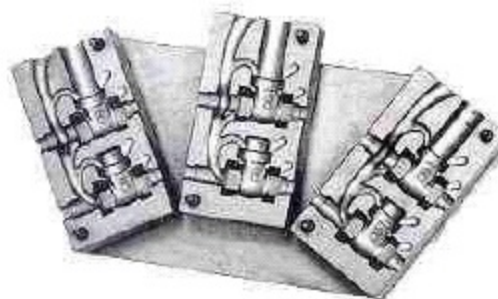
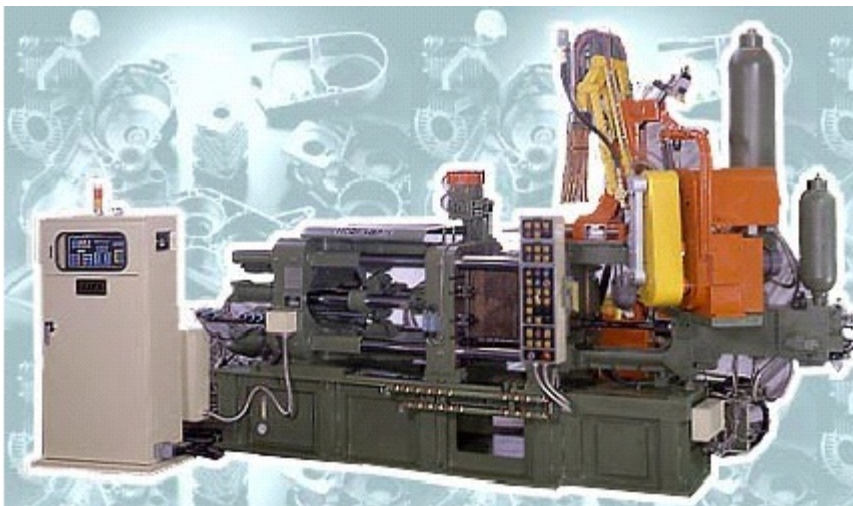
Microfusione



Microfusione



Colata in conchiglia



Colata in conchiglia

Colata in conchiglia

La forma è metallica ed è destinata ad essere utilizzata un elevato numero di volte.

Il costo di produzione della conchiglia ne giustifica l'utilizzo solo nelle grandi serie ed in processi altamente automatizzati.

La qualità dei getti è molto elevata poiché:

- Non vi sono deformazioni importanti della forma
- La superficie della forma presenta un'ottima finitura
- Lo scambio termico tra metallo fuso e forma è elevato \Rightarrow grana fine
- Si evita la possibilità che si producano inclusioni non metalliche
- Si evitano possibili reazioni con il materiale di formatura
- Si riduce l'entità delle segregazioni

Dato che la porosità della forma è nulla, è necessario prevedere opportuni **canali di sfogo** per i gas e l'aria.

Colata in conchiglia

E' necessario mantenere la conchiglia a temperatura opportuna per evitare da un lato raffreddamenti troppo bruschi dei getti, dall'altro un surriscaldamento del materiale costituente la conchiglia stessa.

Sono colabili in conchiglia materiali che presentino bassi valori di viscosità allo stato fuso e zona "pastosa" ristretta e la cui temperatura di fusione non sia eccessiva.

In genere tale tecnica è indicata per le leghe di alluminio, per i bronzi e per gli ottoni.

Poiché vi è la necessità di movimentare la conchiglia mediante opportune macchine, è possibile produrre unicamente pezzi di dimensione medio-piccola.

Il principale svantaggio della tecnica, oltre alle già citate limitazioni, è costituito dal costo di produzione delle conchiglie.

Per quanto riguarda il dimensionamento delle conchiglie vale generalmente (salvo opportuni adattamenti) quanto già detto a proposito della preparazione delle forme in terra.

Colata in conchiglia

Le conchiglie vengono costruite con acciai speciali, scelti in base al tipo di metallo da fondere, delle condizioni operative, delle dimensioni della conchiglia, ecc.

Caratteristiche comuni dei materiali per stampi sono: la resistenza alla fatica termomeccanica, agli shock termici, all'abrasione ed alla corrosione, la lavorabilità allo stato normalizzato e la stabilità dimensionale al ciclo termico di bonifica.

Il riempimento della conchiglia può avvenire con diverse modalità:

- Per gravità
- A bassa pressione
- Ad alta pressione
- Per forza centrifuga

Di ciascuno di questi metodi verrà data nelle pagine seguenti una breve descrizione.

Colata in conchiglia per gravità

Colata in conchiglia per gravità

La pressione metallostatica generata dalla forza di gravità provvede al riempimento della cavità al fine dell'ottenimento di getti sani.

Il metallo fuso viene introdotto attraverso un canale di colata nella cavità formata dalle due semiconchiglie perfettamente combacianti in quanto munite di spine di riferimento.

Il canale di colata stesso funge da serbatoio di metallo liquido, anche se talvolta è necessario prevedere ulteriori cavità aventi funzione di materozze e sfiatatoi.

E' possibile introdurre nella forma anime di tipo transitorio o anime metalliche: in quest'ultimo caso esse devono essere estratte a getto appena solidificato per evitare lesioni del getto stesso dovute alla contrazione durante il raffreddamento.

La finitura superficiale ottenibile è buona (valori di R_a dell'ordine di qualche μm), così come pure le tolleranze.

Ha notevole importanza, per ottenere elevata qualità dei getti ed, al contempo, elevata produttività del processo, la scelta del *superheat*.

Colata in conchiglia per gravità

E' pratica comune effettuare la colata basculando la conchiglia, al fine di ottenere un riempimento più dolce ed una completa evacuazione dei gas presenti.

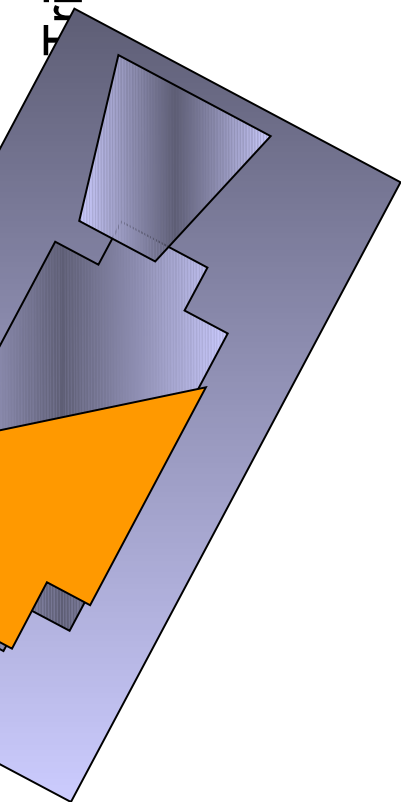
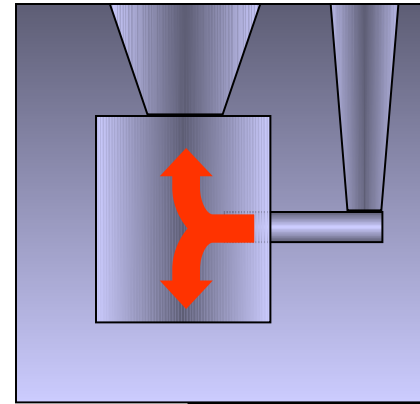
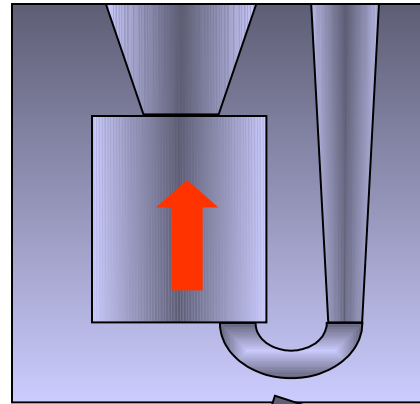
In genere, ad ogni ciclo di colata, la conchiglia viene rivestita internamente, per immersione, con opportune sostanze refrattarie, lubrificanti e distaccanti (grafite, nerofumo, talco, ecc.) allo scopo di favorire lo scorrimento della lega fusa, migliorare il distacco del getto e preservare dall'usura la superficie della conchiglia.

In questo modo vi è inoltre il vantaggio ulteriore di poter controllare, variando il tempo di immersione, il raffreddamento della forma.

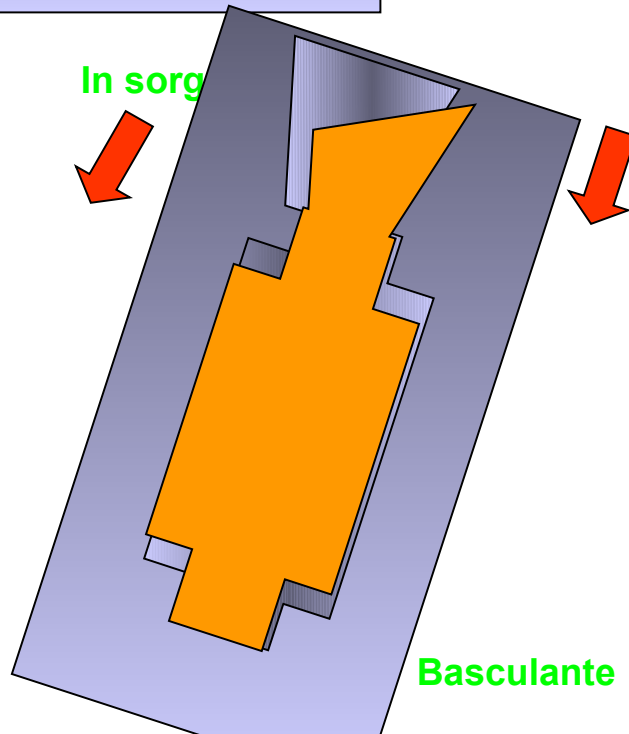
Il dimensionamento del sistema di colata viene effettuato con criteri simili a quelli già discussi nel caso della colata in forma transitoria.

Colata in conchiglia per gravità

Esempi di modalità di riempimento di conchiglie per gravità:

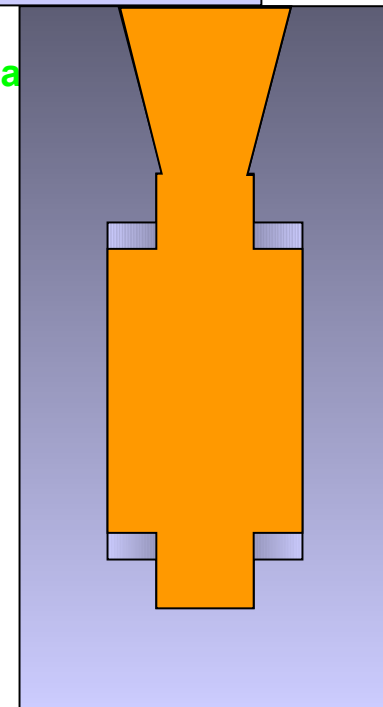


In sorg



Basculante

La

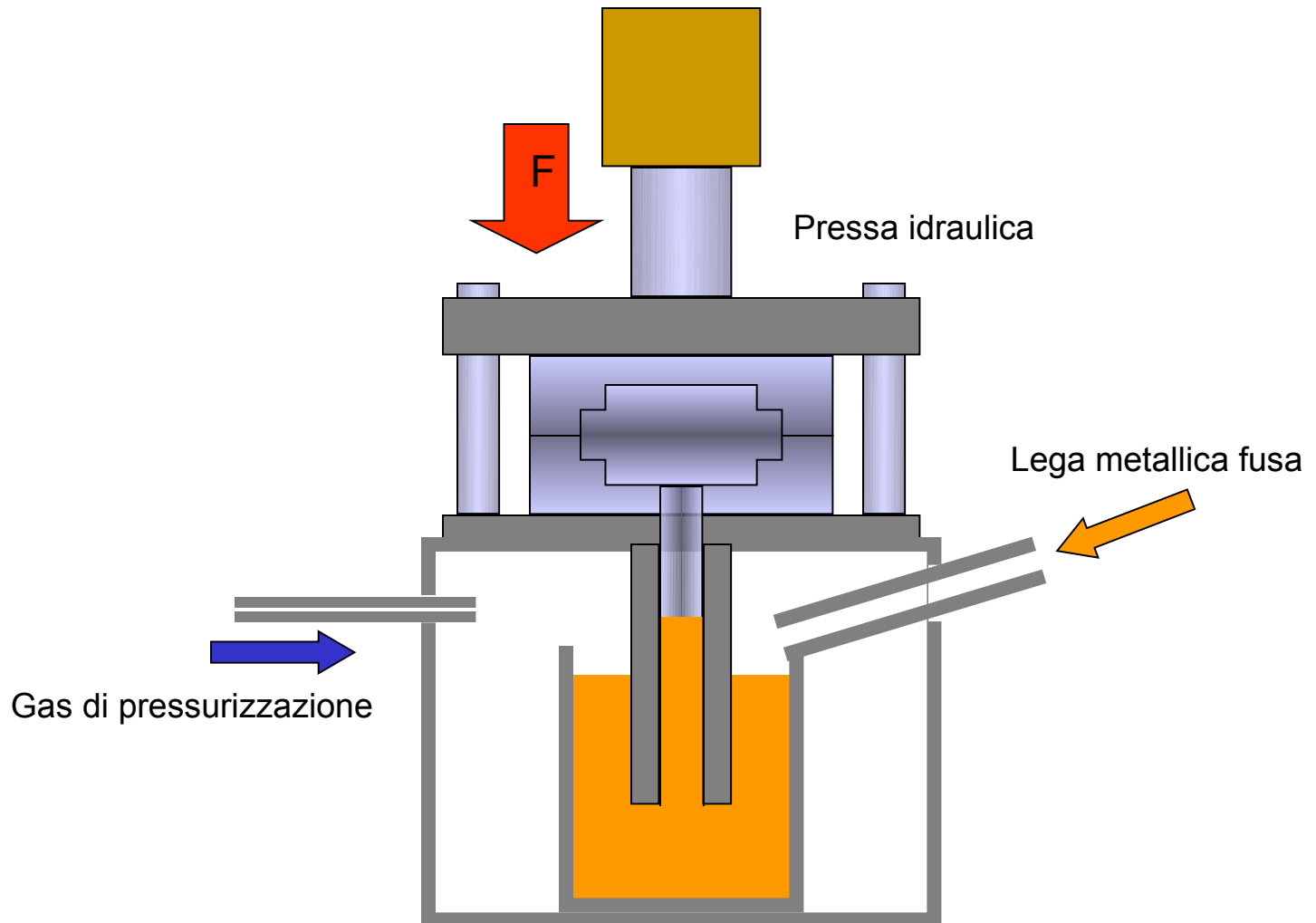


Colata in conchiglia per gravità

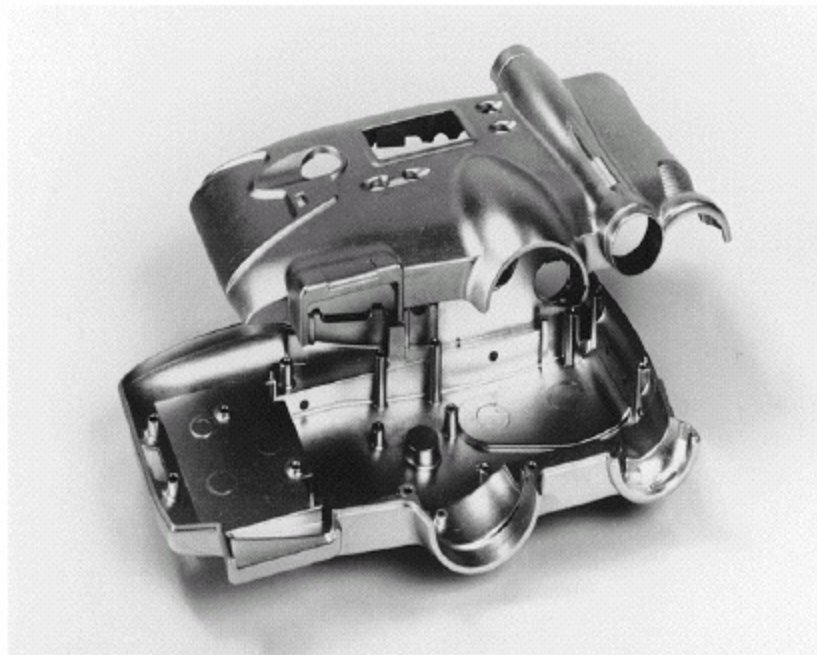


Colata in c. a bassa pressione

Schema dell'attrezzatura.



Pressofusione



Pressofusione



Pressofusione



Pressofusione

Colata in conchiglia sotto pressione (pressofusione)

Il metallo fuso viene iniettato nella conchiglia ad alta pressione: in tal modo il riempimento completo è garantito e la possibilità di formazione di difetti è molto bassa.

La finitura superficiale e le tolleranze dimensionali sono ottime, tanto che spesso è possibile evitare o ridurre al minimo le successive lavorazioni di finitura.

L'attrezzatura necessaria è molto costosa e la produttività elevata, cosicché il processo è conveniente solo per produzioni di grande serie in impianti altamente automatizzati.

La durata delle conchiglie è compresa generalmente tra i 50.000-60.000 pezzi nel caso di leghe molto aggressive sino a 100.000-200.000 pezzi nei casi migliori.

La dimensione delle macchine impiegate determina la dimensione massima dei pezzi ottenibili (generalmente non si supera mai la decina di kg di peso).

Pressofusione

Possono essere impiegati due tipi principali di macchine:

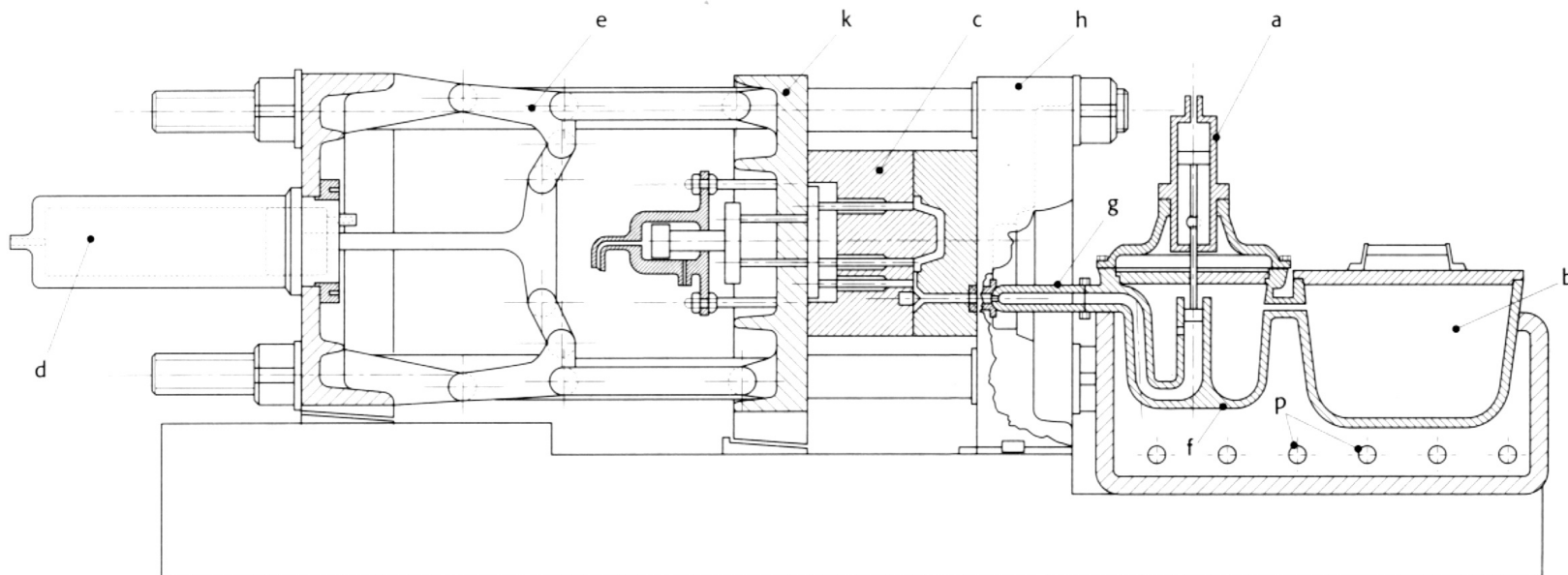
Macchine a camera calda: la macchina stessa è dotata di un crogiolo in cui vi è una certa quantità di lega allo stato liquido in attesa. E' possibile controllare l'atmosfera all'interno del crogiolo, per cui è possibile iniettare anche leghe suscettibili di ossidazione (leghe di magnesio). In queste macchine il controllo della temperatura è molto semplice, non essendo necessario effettuare operazioni di trasporto della lega fusa. La produttività è molto elevata.

Macchine a camera fredda: la quantità di metallo fuso necessaria ad ogni ciclo è prelevata in maniera automatica da un crogiolo posto nelle vicinanze della macchina. Tali macchine sono più adatte alle leghe di alluminio in quanto è possibile evitare il contatto prolungato con crogioli il acciaio (il che comporta un certo grado di contaminazione).

Nelle pagine seguenti sono riportate le rappresentazioni in sezione delle macchine appena descritte.

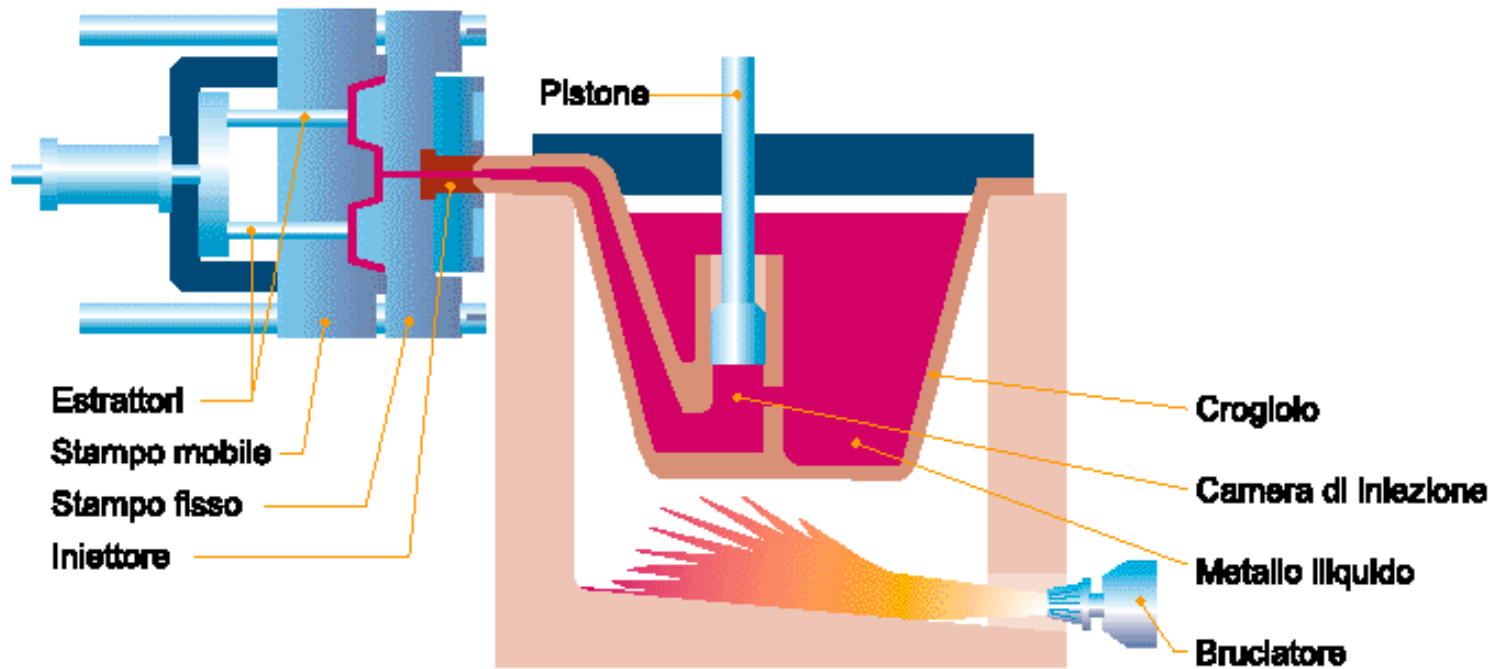
Pressofusione

Rappresentazione di macchina a camera calda



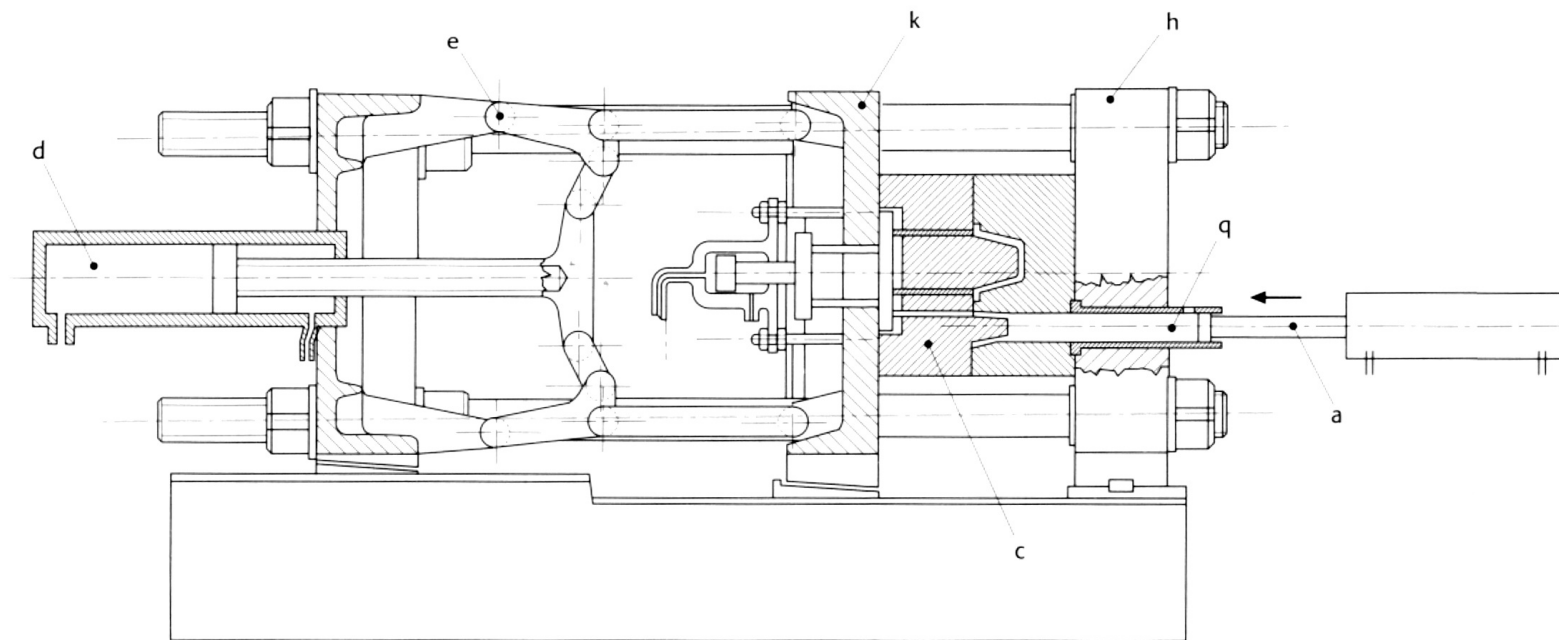
Pressofusione

Rappresentazione di macchina a camera calda



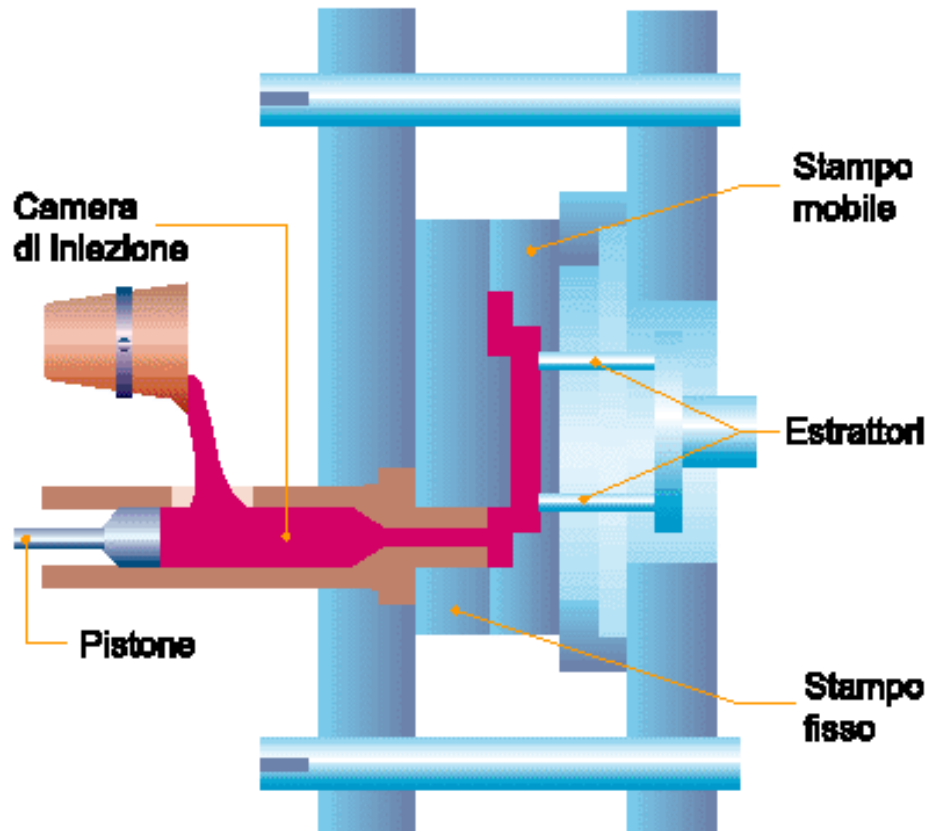
Pressofusione

Rappresentazione di macchina a camera fredda

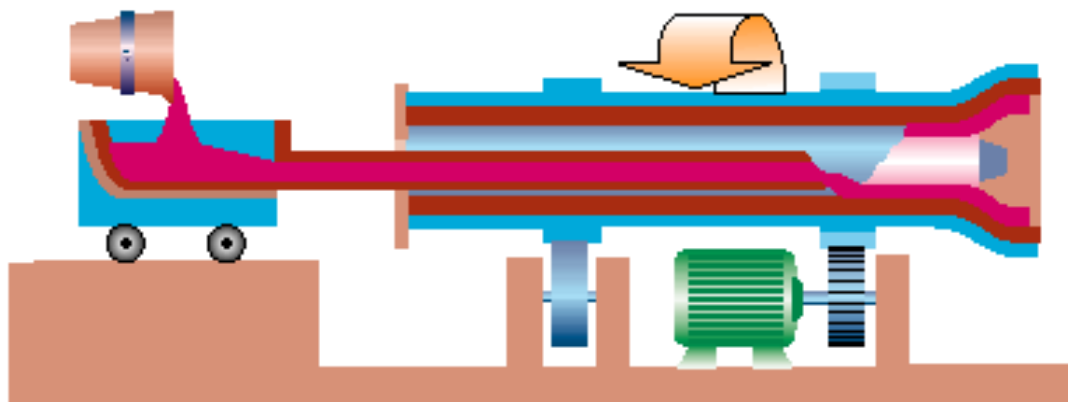
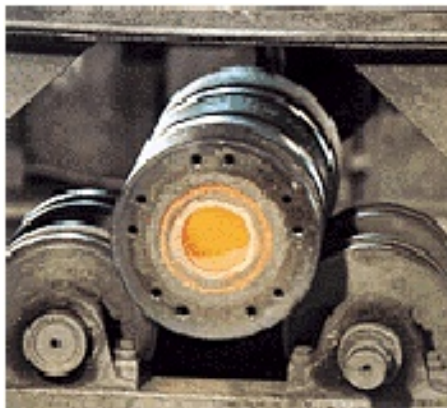


Pressofusione

Rappresentazione di macchina a camera fredda



Colata centrifuga



Colata centrifuga

Colata in conchiglia per forza centrifuga

Il metallo liquido viene fatto aderire alle pareti della conchiglia posta in rotazione attorno al proprio asse (intorno ai 1000 giri/min).

La pressione generata consente di ottenere manufatti cavi di ottime caratteristiche metallurgiche e meccaniche (struttura fine, assenza di porosità interdendritica, assenza di inclusioni gassose, assenza di ritiri, ecc.).

Lo spessore della parete del getto è determinato dalla quantità di metallo fuso immesso.

L'asse di rotazione della macchina può essere verticale, nel caso di getti di altezza ridotta, o orizzontale-obliquo.

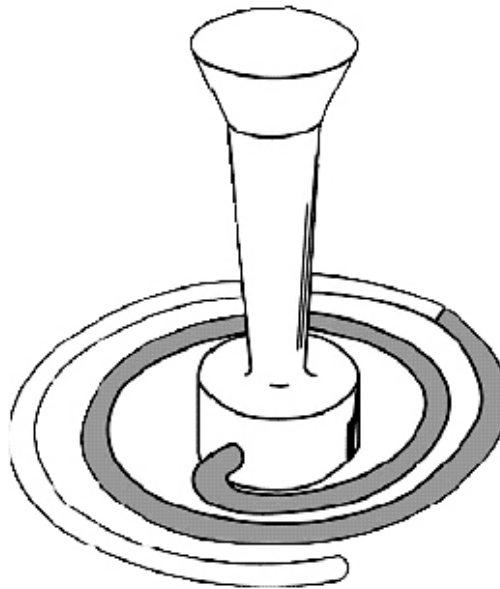
Es.: produzione di tubi in ghisa centrifugati (SERTUBI, Ts).

Fluidità

Fluidità

Durante la solidificazione la lega metallica, dal punto di vista della viscosità macroscopica, passa attraverso uno stato pastoso. Esso è dovuto alla compresenza di particelle di solido (dendriti) e di metallo ancora allo stato liquido.

La conoscenza delle caratteristiche di fluidità della colata è un parametro di notevole interesse tecnologico soprattutto in getti comprendenti sezioni sottili.



Tensione superficiale

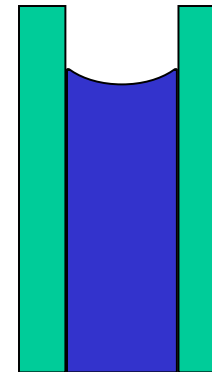
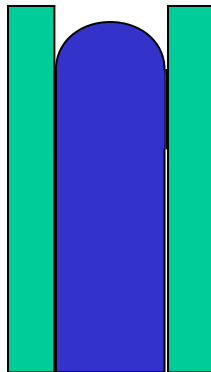
Tensione superficiale

La tensione superficiale fornisce indicazioni sulla bagnabilità della forma e sulla capacità del metallo fuso di fluire in sezioni sottili.



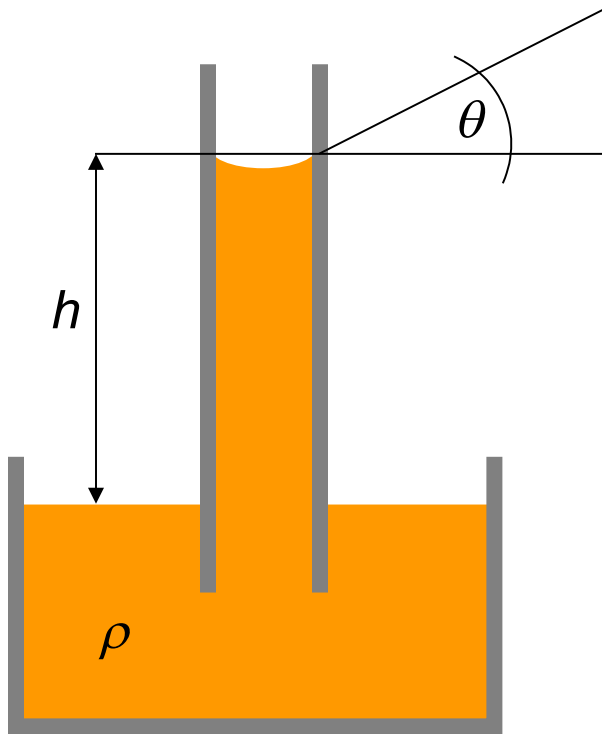
Scarsa bagnabilità

Buona bagnabilità



Tensione superficiale

Una superficie bagnabile favorisce il riempimento delle cavità di piccolo diametro perché il sistema forma/metallo fuso possiede un'energia interfacciale minore di quello forma/aria.

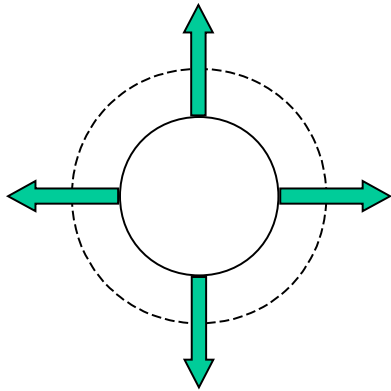
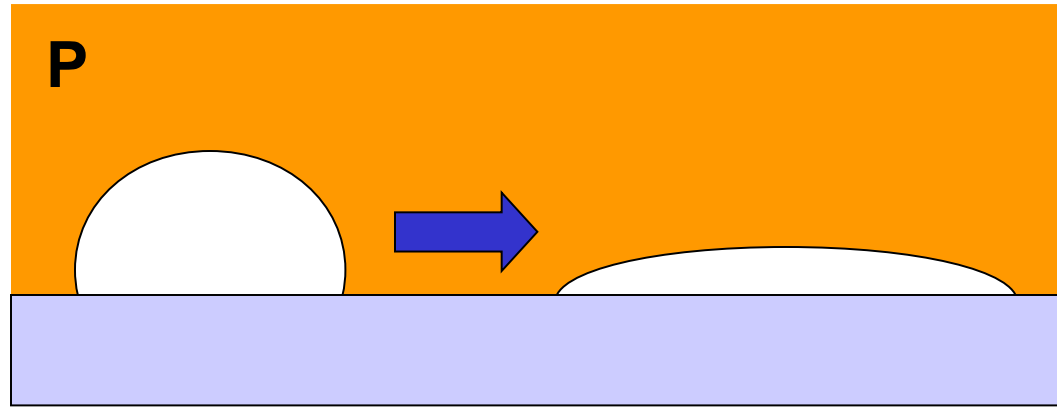


$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos(\theta) = \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot g \cdot h \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho \cdot g \cdot h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{r}$$

Tensione superficiale

La tensione superficiale gioca un ruolo importante anche nel fenomeno dello “schiacciamento” delle bolle d’aria intrappolate nella forma.



$$\Delta P \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta P = \frac{2 \cdot \gamma}{r}$$

Solubilità dei gas

Ogni gas ha una certa solubilità nella lega liquida e solida e, in generale, tali valori sono diversi.

Se la solubilità di un certo gas nel metallo liquido è maggiore di quella del medesimo gas nel solido (caso più comune), la concentrazione di gas nel fuso deve essere inferiore alla solubilità nel solido, altrimenti si formano bolle.

La solubilità di un certo gas disciolta nel metallo fuso in condizioni di equilibrio è legata alla pressione parziale del gas stesso dalla seguente relazione (legge di Sievert):

$$S = k \cdot \sqrt{p}$$

S è la solubilità (es.: [g/dm³]), k è una costante e p è la pressione parziale del gas considerato insistente sulla siviera.