

Progettazione e validazione numerica di uno stampo per pressocolata

parte 1

La progettazione di un dispositivo di colata integrando i dimensionamenti tradizionali e la simulazione del processo

1 Il tema della progettazione di uno stampo da pressofusione coinvolge tutti i settori di applicazione di questa tecnologia. Per una buona progettazione di uno stampo è necessaria una forte collaborazione tra il progettista del componente, il progettista dello stampo e il progettista del processo di pressocolata. La simulazione del processo viene utilizzata non solo come validazione del progetto (come abitualmente accade nelle fonderie) ma come strumento a supporto del progettista in ogni fase della realizzazione del nuovo stampo. Un buon risultato deve tenere sempre in considerazione, per quanto le esigenze estetiche e d'impiego lo consentano, tre elementi fondamentali:

- massima semplificazione della costruzione dello stampo;
- integrità strutturale del getto;
- correttezza dimensionale del getto in funzione della sua scomposizione nello stampo.

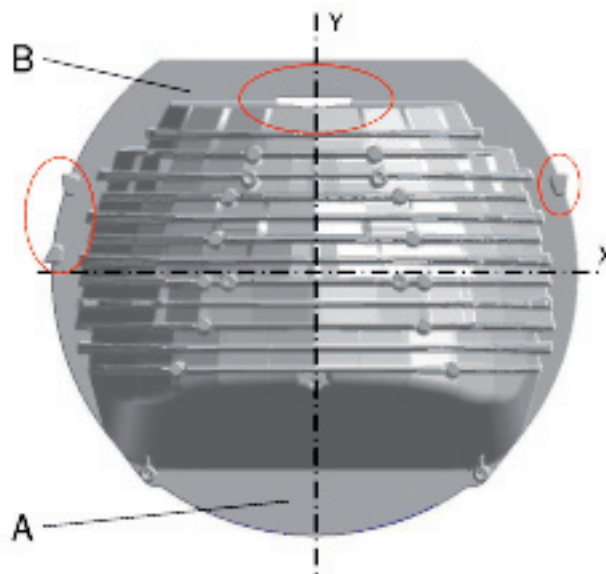
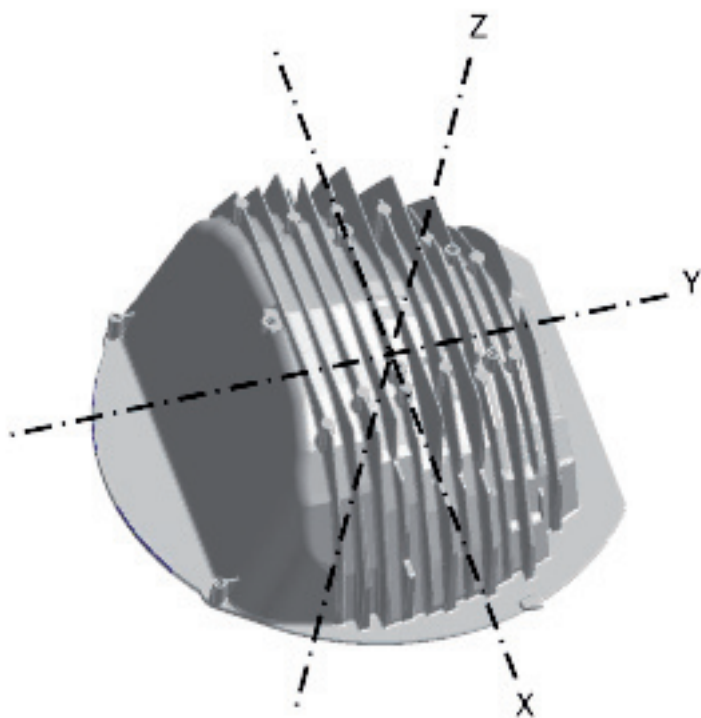
La progettazione dello stampo, in particolare, è funzione delle dimensioni e della forma del pezzo da produrre nonché della macchina su cui questo va montato.

Di seguito viene proposto un esempio applicativo di linee guida generali di progettazione che possono essere

condivise per la realizzazione di un prodotto tecnologicamente e quindi economicamente valido.

Analisi preliminare e orientamento del pezzo nello stampo

Con la collaborazione di un'azienda di pressofusione si è scelto di effettuare la stesura di una procedura progettuale replicabile su più componenti partendo da un caso applicativo di produzione. Il componente da realizzare è il coperchio in **fig. 1**. Il primo aspetto fondamentale da analizzare è l'orientamento del componente all'interno dello stampo. La scelta dell'orientamento del pezzo può portare a radicali cambiamenti nella concezione e costruzione delle matrici o influire in maniera determinante sulle caratteristiche estetiche, meccaniche, dimensionali, strutturali, e sulle operazioni di finitura; in definitiva può portare a grossi cambiamenti di costi nella produzione del componente. Su questo aspetto ogni progettista dovrà tener conto principalmente della geometria del componente e del possibile posizionamento degli attacchi di colata in modo da agevolare le dinamiche di riempimento della figura. Nel caso preso in esame si possono fare alcune valutazioni che porteranno alla scelta dell'orientamento del



componente:

- posizionare la superficie x-z (**fig. 1**) coincidente con il piano di divisione delle matrici porterebbe alla realizzazione di matrici troppo profonde;
- le migliori zone in cui realizzare la colata sono i lati A e B, perché negli altri sono presenti discontinuità (evidenziate in rosso in **fig. 2**).

Da queste considerazioni discende la scelta di far giacere la superficie x-y del pezzo sul piano di divisione dello stampo. Per quanto riguarda il sistema di colata si preferisce posizionarlo sul lato A, visto che il lato B opposto presenta un'asola che creerebbe ostacoli al flusso del metallo in entrata. Per queste ragioni l'orientamento del componente che si è ritenuto ottimale è quello mostrato in **fig. 2** con il lato A in basso.

Forze sullo stampo e scelta della pressa

Lo stampo nelle condizioni di lavoro è sottoposto a diverse sollecitazioni. La conoscenza e la determinazione dell'entità di queste forze è fondamentale al fine del dimensionamento dello stampo stesso. Sul metallo fuso, nella fase finale di iniezione, per alimentare il ritiro di solidificazione della lega, viene applicata una pressione; questa genera una forza che tende ad aprire i due semistampi.

Tale forza di apertura sarà data da $F_s = p \cdot A_{stamp}$, dove p = pressione specifica, A_{stamp} = area frontale del componente. Occorre puntualizzare che per "pressione specifica" si intende la pressione effettiva che agisce sul metallo nella fase di spinta e non la pressione di iniezione.

La forza del cilindro di iniezione e la

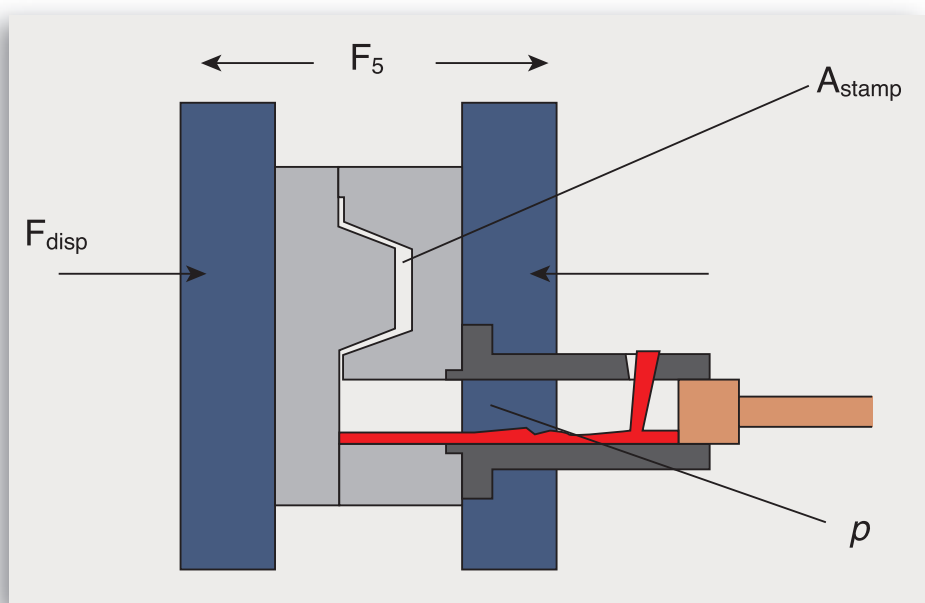
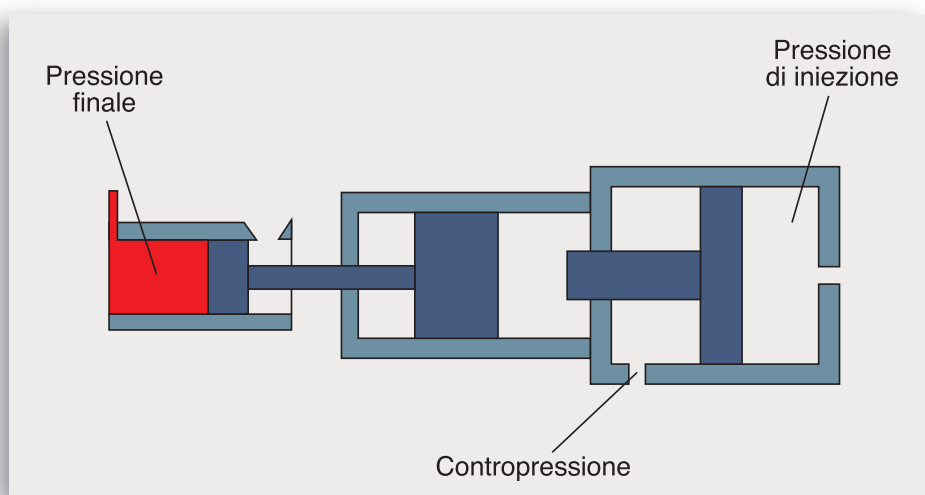
pressione di iniezione sono date dal nomogramma della macchina e sono parametri fondamentali del processo. Nella maggior parte delle macchine in servizio, la pressione del fluido idraulico nel cilindro di iniezione nella fase di pressione viene incrementata da un sistema di moltiplicazione. Il principio di funzionamento è quello del martinetto idraulico (**fig. 3**).

I dati dei rapporti di moltiplicazione della pressione e dei rapporti tra cilindro di iniezione e diametro del pistone sono forniti dai costruttori delle macchine, è tuttavia possibile variare questo rapporto applicando davanti al moltiplicatore una contropressione che si oppone alla spinta riducendo la pressione effettiva nel cilindro di iniezione al valore desiderato.

Le pressioni specifiche applicate sul metallo sono di diversa entità in

Tab. 1 Dimensionamento empirico della materozza

Caratteristiche pezzo da realizzare	Diametro	Altezza
Pezzi massivi con elevate caratteristiche meccaniche	D	D/3
Pezzi sottili e senza particolari esigenze	D	D/4



funzione delle caratteristiche del pezzo da produrre:

- per pezzi standard, pressione: fino a 40 MPa;
- per pezzi di maggior complessità, pressione: (40-60) MPa;
- per pezzi con tenuta a pressione: (60-100) MPa.

Per il componente preso in esame non è richiesta tenuta a pressione ma deve presentare ottime caratteristiche estetiche e presenta spessori molto sottili in corrispondenza delle alette, quindi si considera una pressione di iniezione di circa 60 MPa.

Le forze principali che agiscono sullo stampo (**fig.4**) sono:

- forza di chiusura della macchina F_{disp} ;
- forza di spinta F_s (che dipende dalla pressione di iniezione).

Per determinare la forza di spinta del metallo F_s bisogna effettuare un primo calcolo indicativo dell'area frontale del componente da stampare. Sia A_{stamp} (**fig.4**) l'area frontale del pezzo da stampare, ad essa bisogna aggiungere l'area di tutti i dispositivi di colata presenti in matrice, cioè materozza, canali di colata, sfoghi dell'aria, eventuali canali di aspirazione del vuoto. Solitamente questo valore aggiuntivo è espresso come percentuale dell'area frontale stessa del componente.

Ipotizzando quindi di aumentare tale area del 30%, la forza di iniezione sarà $F_s = p (A_{stamp} + 0,3 A_{stamp})$.

Il componente in esame presenta una superficie stampabile pari a 72.800 mm², quindi $F_s = 60 (72.800 + 72.800 * 0,3) = 5.678.400$ N, che corrispondono a circa 568 t.

La stima di questa forza ricopre un ruolo fondamentale perché permette di effettuare la scelta della pressa più opportuna con cui realizzare la produzione del componente.

Ipotizziamo di scegliere, fra l'ipotetico parco macchine di cui si dispone, una pressa con forza di chiusura nominale $F_{pressa} = 750$ t.

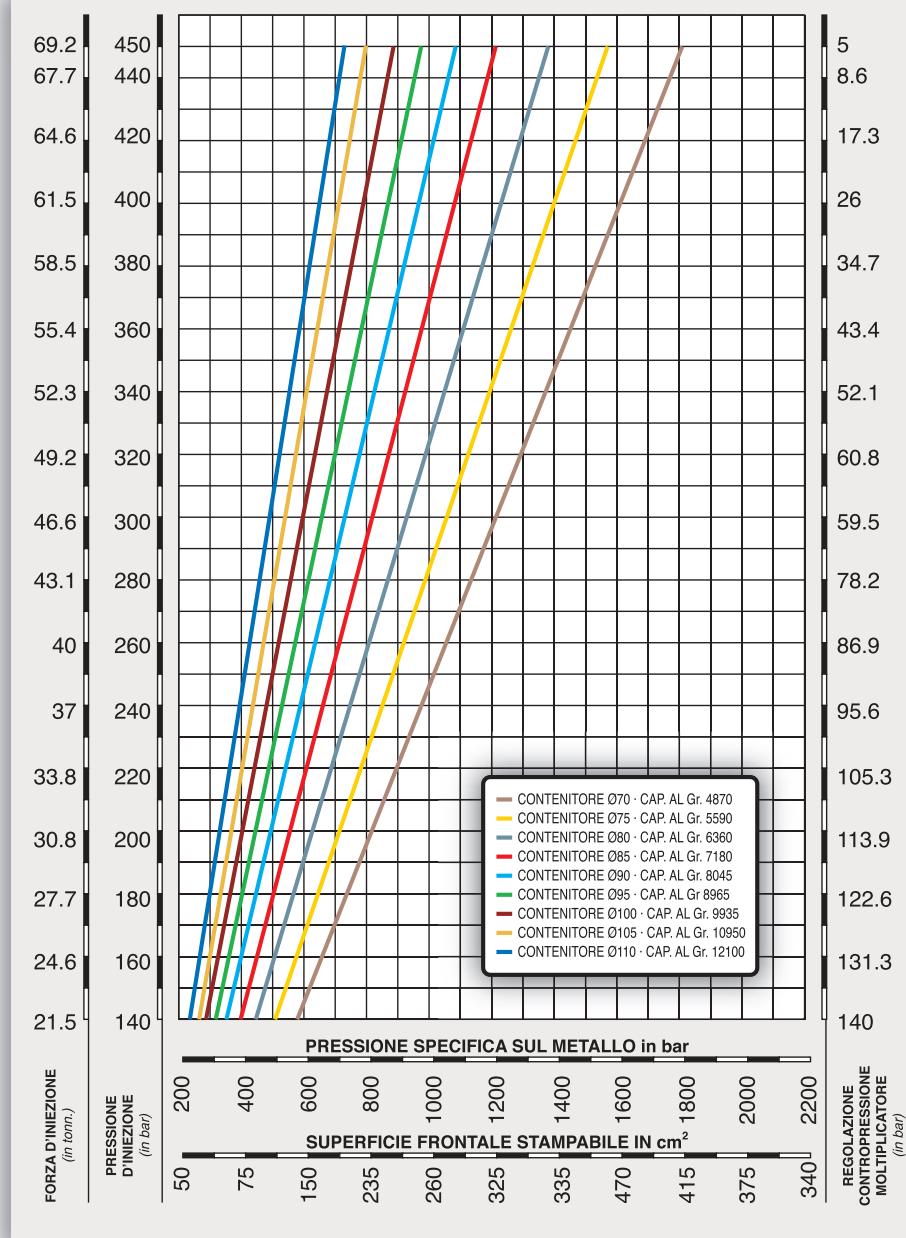
Per verificare questa scelta bisogna considerare che la forza nominale della pressa è la forza di chiusura e che oltre alla pressione dell'alluminio fuso iniettato, agisce anche l'inerzia delle masse in movimento per cui si considera come valore della forza di chiusura massima della pressa $F_{disp} = 0,8 * F_{pressa} = 600$ t.

Naturalmente la scelta risulterà verificata se la pressa avrà una forza disponibile maggiore di quella calcolata in precedenza:

$$F_{disp} > F_s$$

Con i dati della pressione specifica è possibile ricavare dal nomogramma della pressa (**fig.5**) la pressione di iniezione e la forza di iniezione ottimali da impostare nella "scheda macchina" per la produzione e verificare se la superficie stampabile calcolata è effettivamente minore di quella ricavata dal grafico.

È opportuno focalizzare l'importanza



della scelta del diametro del contenitore, cioè del cilindro che contiene il pistone di iniezione. Questo influisce:

- sulla sede da realizzare in matrice fissa;
- sulla dimensione del canale principale di colata;
- sul tasso di riempimento e quindi su tutti gli altri parametri di iniezione.

Si ipotizzi di scegliere un contenitore di diametro 80 mm ($D = 80$ mm) e si analizzi il nomogramma di **fig. 5**. Dal diagramma si ricava: pressione di iniezione = 200 bar, forza di iniezione = 30.8 t, area massima stampabile = 1250 cm².

Per verificare che l'area effettiva stampabile sia maggiore di quella calcolata, si considera un aumento di tale area di un 30%, relativo all'area del pistone, e dei canali di colata: $A_{\text{stam}} = 1,3 \cdot 728 = 946$ cm². Questo valore è minore di quello ricavato sul nomogramma, e quindi la scelta della pressa e del contenitore è verificata.

Progettazione dispositivo di colata

Si proceda ora con l'analisi del dispositivo di colata, denominato anche sistema di alimentazione

(**fig. 6**). Questo deve assolvere principalmente a tre funzioni:

- convogliare il metallo fuso dal contenitore verso la cavità dello stampo;
- facilitare lo sfogo dell'aria e dei gas per assicurare un regolare riempimento;
- assicurare la pressione necessaria per ottenere un pezzo integro.

Fintanto che il metallo rimane in fase liquida, il sistema può essere analizzato basandosi sulle leggi della fluidodinamica. In quest'ottica il dispositivo di colata deve essere progettato e realizzato in modo che presenti i seguenti requisiti:

- assenza di condizioni di turbolenza localizzata;
- minima resistenza al moto del fluido.

Occorre considerare, inoltre, gli aspetti termici che interessano il metallo in transito attraverso il sistema di colata, la cui conformazione deve essere tale da contenere lo scambio termico tra stampo e lega fusa per evitarne un eccessivo raffreddamento.

Materozza

In un ciclo di pressocolata, non tutto il metallo liquido viene espulso dal contenitore. Su questa parte di lega, chiamata materozza (**fig. 6**), agisce la pressione di compattazione per compensarne il ritiro di solidificazione del pezzo. È intuibile come la materozza dovrà essere l'ultima parte del getto a solidificarsi. Da questa esigenza discende la necessità di dotare la materozza di uno spessore

adeguatamente ampio.

D'altro canto, la quantità di tempo che la materozza impiega a solidificarsi, ha un forte impatto sul tempo ciclo. Per aumentare la produttività occorrerebbe quindi limitare lo spessore della materozza.

Da queste contrastanti necessità derivano alcune formulazioni empiriche di dimensionamento, che sono riportate in tab. 1, dove D rappresenta il diametro del contenitore.

Collegamento tra contenitore e materozza

A questo punto è opportuno dare qualche indicazione sulla realizzazione del collegamento tra contenitore (e quindi materozza) e canale di

colata; le modalità con cui effettuare tale collegamento sono svariate e un grosso aiuto nella scelta della geometria ottimale può essere dato dalla simulazione di riempimento del contenitore. Nella **fig. 7** sono mostrati alcuni esempi ed evidenziati i problemi più rilevanti di ciascuno di essi:

In base a quanto mostrato è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- se si sceglie di realizzare il collegamento senza raccordi e quindi in modo diretto tra canale e contenitore è preferibile che il canale rimanga sotto l'asse del cilindro;
- se si decide di realizzare un collegamento ben raccordato è opportuno sia creare ampi raggi di collegamento tra canale e cilindro, sia scegliere la forma più adatta di questi raccordi per evitare intrappolamento

di aria all'interno del contenitore e il rischio di aumentare la quantità di difetti nel getto;

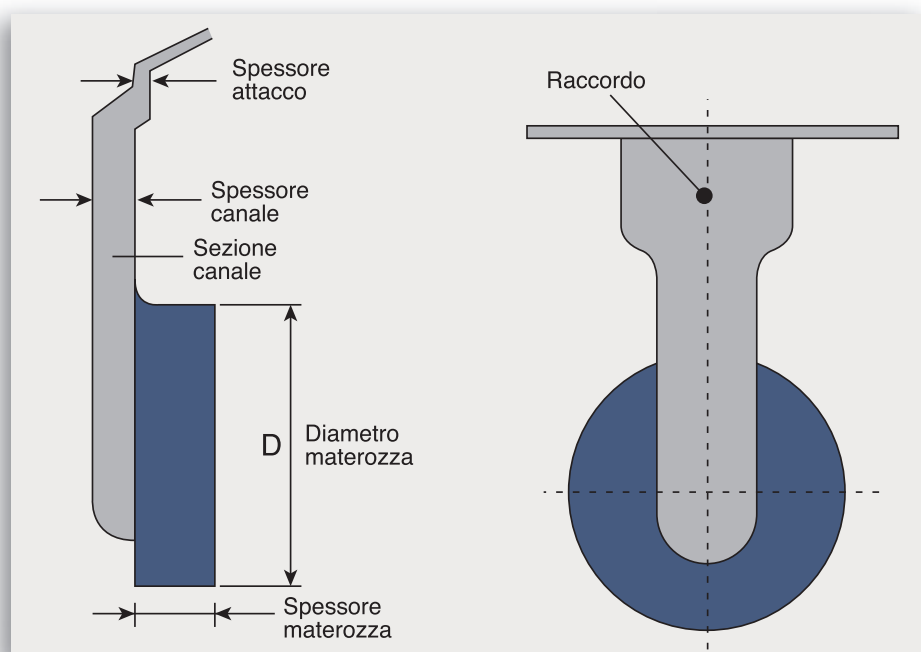
– il corretto riempimento è funzione anche della velocità di prima fase. Nella seconda parte dell'articolo sarà effettuata l'analisi dell'influenza di questo parametro attraverso la simulazione di riempimento del contenitore.

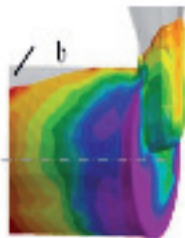
Attacchi di colata

Il passaggio successivo è il posizionamento e dimensionamento degli attacchi di colata che vanno a influire in maniera diretta sulla direzione e velocità di ingresso del metallo nella figura.

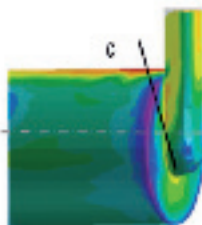
È opportuno ricordare come un aspetto fondamentale nella pressofusione sia l'ottenimento di buone finiture superficiali e tolleranze geometriche del getto.

È stato accertato che uno dei fattori determinanti è la velocità del metallo che entra nello stampo, unitamente al tempo di riempimento, cioè la velocità all'attacco di colata. Questa è quella che compete al metallo che attraversa la bocca di ingresso dello stampo. Questa velocità è direttamente legata alle caratteristiche della macchina. Considerando la bocca di riempimento come un sistema idraulico a libero efflusso, la pressione posseduta dal metallo che fluisce sarà condizionata dalla resistenza al flusso del metallo stesso entro il condotto. Il condotto è costituito dal braccio di colata, che si restringe in corrispondenza

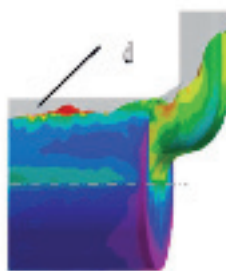
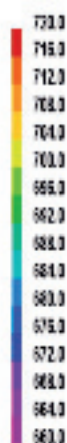




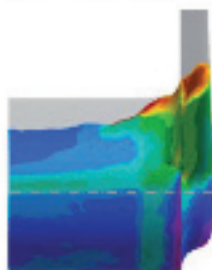
In questo caso il canale di colata è collegato senza raccordi ed è posizionato sopra l'asse del contenitore. Questo provoca un eccessivo ristagno della lega nella parte inferiore e terminale del cilindro (zona a in figura) con un inaccettabile diminuzione della temperatura della lega stessa. Inoltre la posizione alta rispetto all'asse del canale crea un'onda di ritorno che va a intrappolare aria all'interno del metallo fuso (zona b)



Lasciando una geometria del canale del tutto simile alla precedente, ma spostandolo molto sotto l'asse del cilindro (zona c), si nota come sia facilitato il flusso della lega verso l'alto. Questo impedisce il ristagno e anche la temperatura si mantiene a livelli più elevati. Inoltre l'onda di ritorno che si forma è meno pronunciata abbassando il rischio di intrappolare aria nel cilindro.



In questo caso il canale di colata è collegato con il contenitore con un raccordo molto ampio ed è posizionato piuttosto in alto rispetto all'asse del cilindro stesso. I problemi riscontrati sono l'eccessivo raffreddamento della lega e la formazione di una forte turbolenza superficiale che rischia di inglobare aria (zona d) all'interno della lega fusa.



In questa figura il canale di colata è collegato con un raccordo ampio, e posizionato molto sotto l'asse del contenitore. Il problema del raffreddamento della lega fusa è in parte migliorato. Ma resta in questo caso il problema dell'inglobamento dell'aria dovuto alla sbagliata geometria del raccordo.



In questo ultimo esempio in cui il canale di colata è collegato tramite raggi molto ampi, geometricamente ben dimensionati, e il collegamento è posizionato proprio al piede del contenitore, i problemi prima riscontrati vengono eliminati. Il riempimento risulta adatto a favorire lo scorrimento senza bruschi raffreddamenti o intrappolamenti di aria.

del pistone, A_p = area del pistone, v_{met} = velocità del metallo all'attacco di colata, $A_{a,col}$ = superficie degli attacchi di colata. Ipotizzando una velocità media agli attacchi di colata di 30 m/s si ottiene $A_{a,col} = (v_p * A_p) / v_{met} = 302 \text{ mm}^2$.

Sulla posizione degli attacchi di colata rispetto al pezzo, si possono effettuare alcune considerazioni. Occorre individuare la migliore localizzazione che può essere o sulla parte massiva o su quella più sottile del componente, tenendo presente che la zona di ingresso del metallo nella cavità dello stampo è sempre una zona calda per via dell'effetto del passaggio di tutto il metallo e per il grosso apporto di calore dato dalla materozza di colata. Da questo punto di vista conviene allontanare da questa zona le parti più massive del pezzo che apporterebbero altro calore.

Di conseguenza, la ricerca del tragitto più breve possibile del canale di alimentazione conduce spesso a prevedere l'attacco sulle parti sottili. Questo metodo di progettazione è valido se il pezzo non presenta spessori troppo sottili, le parti massive non sono molto lontane dall'attacco. Per contro, su pezzi che hanno zone massive molto importanti, un attacco di grosso spessore su queste parti permette sicuramente di compensare meglio il ritiro di solidificazione e di portare alla realizzazione di pezzi più compatti. Inoltre è fondamentale l'equilibrio termico delle varie zone dello stampo, da realizzarsi con sistemi di raffreddamento appropriati,

all'attacco. In corrispondenza della sezione ristretta, la pressione diminuisce e la velocità aumenta. Le velocità all'attacco di colata:
– non devono essere troppo basse per evitare tempi di riempimento troppo lunghi e quindi raffreddamento della lega prima dell'ingresso nella figura; non devono essere troppo elevate per evitare rischio di erosione e quindi una

precoce usura dello stampo. Di norma si adottano velocità all'attacco di colata comprese tra 20 m/s e 50 m/s. La velocità è determinata dalla sezione dell'attacco di colata e dalla sezione e velocità del pistone di iniezione, quindi è possibile scrivere l'equazione di continuità delle portate: $v_p * A_p = v_{met} * A_{a,col}$ dove v_p = velocità



materozze di tracimazione che scaldino le zone più fredde perché più sottili, percorso adeguato dei canali di alimentazione.

Spesso la soluzione migliore risulta essere una combinazione di tutti gli aspetti sopra citati.

Per scegliere la posizione e la forma degli attacchi di colata, ritorna fondamentale l'ausilio della simulazione. Con questo è possibile studiare diverse ipotesi progettuali per poi arrivare alla soluzione che garantisca un riempimento ottimale. Nel caso applicativo finora analizzato, in prima battuta, si sono ipotizzati due attacchi di colata di sezione rettangolare (2 x 75 mm).

La simulazione mette subito in luce un problema, ovvero la realizzazione di due attacchi separati crea due flussi di metallo liquido (**fig. 8**) che si richiudono lasciando una zona piuttosto grande isolata e quindi piena di aria che rimarrà inglobata all'interno del getto. Come seconda ipotesi si è realizzato un attacco di colata unico di spessore 2 mm (**fig. 9**). Il riempimento è molto più graduale

senza rischi di inglobamento dell'aria. Ricordando l'equazione precedente di continuità delle portate, se si modificano le dimensioni dell'attacco di colata, bisogna modificare la velocità del pistone per mantenere la velocità del metallo adeguata. L'attacco dovrà essere costruito in modo che il taglio del boccame sia facilitato e comporti il minimo di lavorazioni successive. Spesso quest'esigenza è in contrasto con la struttura e la conformazione richieste per la riuscita del pezzo, specialmente per ciò che concerne la qualità. Sarebbe un grosso errore sacrificare la qualità o rendere problematica la riuscita del pezzo per facilitarne la separazione dalla colata. Nella **fig. 10** sono mostrate alcune conformazioni tipiche con vantaggi e svantaggi.

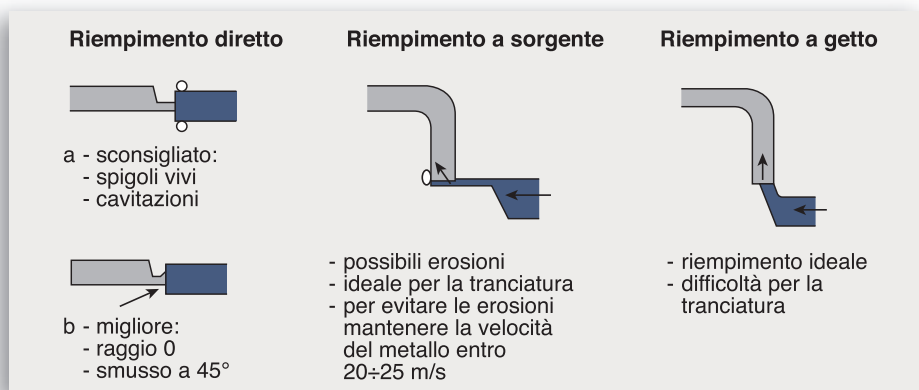
Canale di colata

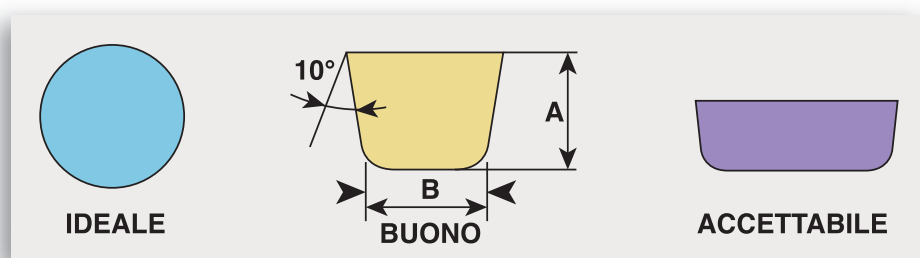
Il canale di colata deve permettere l'afflusso del metallo fuso con la minime perdite di carico e di calore. Per soddisfare a queste esigenze il canale dovrà essere della sezione

adeguata, di forma avente il minor rapporto superficie/volume per contenere le perdite di calore, della minima lunghezza possibile e tale da favorire il flusso del metallo.

Per quanto riguarda la sezione del canale essa dovrà essere commisurata all'area scelta per l'attacco di colata: $A_{can} = A_{a.col} * (2-3)$. La **fig. 11** mostra alcune possibili sezioni del canale. L'attacco di colata presenta sempre un fronte di larghezza maggiore a quella del canale per cui è necessario creare raccordi tra le sezioni. Il raccordo è quindi un prolungamento vero e proprio del canale di colata dal quale differisce per forma e dimensione. Le modalità realizzative di tale raccordo possono essere a sezione costante o a sezione decrescente.

Se il raccordo è realizzato a sezione costante la velocità del metallo fuso è uguale dalla materozza fino al restringimento dell'attacco di colata. Se invece è a sezione decrescente, la velocità aumenta progressivamente e proporzionalmente man mano che ci si avvicina all'attacco. Seguendo le regole di progettazione fin qui esposte, si determina la geometria del sistema di colata (**fig. 12**). Per validare il dimensionamento è stata effettuata una simulazione di riempimento del contenitore e del dispositivo di colata. In **fig. 13** vengono messi in evidenza i risultati ottenuti. Ultimo aspetto fondamentale da tenere in considerazione è l'influenza del tempo di solidificazione. Anche questo aspetto è analizzabile con l'ausilio della simulazione. In **fig. 14** si mostra



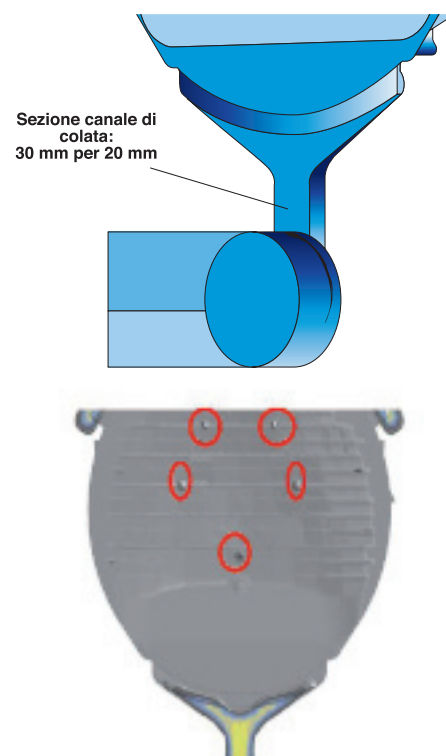


come l'attacco di colata rimanga liquido fino alla solidificazione quasi completa della figura permettendo alla pressione di terza fase di agire per un tempo necessario a compensare le porosità da ritiro. Nell'istante in cui l'attacco di colata è completamente solidificato, sono poche le zone del getto ancora semisolidi, evidenziate in rosso in **fig. 14**.

Conclusioni

In questa prima trattazione (che sarà seguita da una seconda parte) si è voluta dare una panoramica generale sulla progettazione di uno stampo da pressofusione e sull'importanza che la simulazione può avere in ogni fase del dimensionamento. In primo luogo sono state date linee guida per l'orientamento del componente all'interno dello stampo.

Successivamente si è scelto di analizzare la progettazione di ogni parte del dispositivo di colata, cioè della materozza, degli attacchi e del canale di colata. Al termine di ogni fase è stata effettuata una simulazione per validare il dimensionamento effettuato. Grazie a questo approccio si è riusciti ad ottenere una serie di considerazioni teoriche e informazioni pratiche che possono essere condivise per la realizzazione di uno stampo e di un prodotto tecnologicamente validi. Nella prossima parte dell'articolo verranno analizzati la progettazione dei sistemi di evacuazione dell'aria, il riempimento del contenitore al variare della velocità di prima fase, il riempimento della figura al variare della velocità di seconda fase, la solidificazione della colata, le soluzioni a eventuali problemi riscontrati con la simulazione.



Bibliografia

- [1] Luigi Andreoni, Mario Casè, Giorgio Pomesano, "Quaderni della colata a pressione delle leghe di alluminio" n.1: Il processo della pressofusione, Edimet, Brescia 1993.
- [2] Pressocolata e tecnologia, Edimet, Brescia.
- [3] A. Bugini, C. Giardini, R. Pacagnella, G. Restelli, "Tecnologia meccanica: Lavorazione per fusione e deformazione plastica", Città Studi Edizioni, Milano 1997.
- [4] "Introduction to Die Casting", American Die Casting Institute, Des Plaines (Illinois, USA) 1985.
- [5] E.A. Herman, "Die Casting Dies: Designing", Society of Die Casting Engineers, River Grove (Illinois, USA) 1979.

