



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Corso di FONDERIA

Relazioni di Fonderia

Studente:
Biagio BARRA 87308
Chiara BREDA 87309

Docente del corso:
Fabio MIANI

Anno Accademico 2012/2013

Indice

1	Processo di fabbricazione dei getti	1
1.1	Formatura a PERDERE	1
1.1.1	Formatura in Sabbia	1
1.1.2	Formatura Lost Foam	3
1.1.3	Formatura a Guscio	3
1.2	Formatura a forma PERMANENTE	4
1.2.1	Formatura da liquido per colata in conchiglia per gravità	4
1.2.2	Colata in conchiglia a bassa pressione	6
1.3	Colata per Centrifugazione	7
1.3.1	Centrifugazione Orizzontale	7
1.3.2	Centrifugazione Verticale	8
1.4	Pressofusione (Die Casting)	8
1.5	Formatura allo stato Semisolido	9
1.6	Squeeze Casting	10
1.7	Mirofusione	11
2	Aspetti Economici della Fonderia	13
2.1	Criteri di scelta di una soluzione produttiva	14
2.2	Aspetto Energetico	15
3	Design per Die Casting	17
3.1	Materiali	17
3.2	Macchine per il Die Casting	18
3.3	Finitura	19
3.4	Determinazione dell'ottimale numero di cavità	20
3.5	Determinazione dell'appropriata grandezza della macchina . .	23
3.5.1	Forza di serraggio	23
3.5.2	Volume iniettato	24
3.5.3	Restrizioni dimensionali della macchina	25
3.6	Stima del tempo del ciclo di pressofusione	25
3.6.1	Versamento della lega fusa	26

INDICE

3.6.2	Iniezione del metallo	26
3.6.3	Raffreddamento del metallo	27
3.6.4	Estrazione del getto e lubrificazione dello stampo	28
3.6.5	Tempo del ciclo di taglio	28
3.7	Stima del costo dello stampo	29
3.7.1	Costo del set di stampi	29
3.7.2	Costo dello stampo di ritaglio	29
4	Design per Colate in Sabbia	31
4.1	Stima dei Costi	31
4.2	Costo del metallo	31
4.3	Costo della sabbia	33
4.4	Costo dell'equipaggiamento	34
4.5	Costi di lavorazione	36
4.6	Ruolo del design per la fonderia in sabbia	37
5	Microfusione	39
5.1	Costo del materiale per il modello e per le anime	39
5.2	Costo di iniezione del modello in cera	40
5.2.1	Tempo di riempimento	41
5.2.2	Tempo di raffreddamento	41
5.2.3	Tempo di espulsione e risistemazione	42
5.3	Costo del processo per anime e modelli	42
5.3.1	Valutazione del costo di iniezione delle anime	43
5.3.2	Costo degli stampi per il modello e le anime	43
5.4	Costo del modello e di assemblamento del grappolo	45
5.4.1	Numero di parti del grappolo	46
5.4.2	Costo per singolo modello	47
5.5	Pulizia e preparazione della superficie	47
5.6	Costo del materiale del guscio	48
5.6.1	Rivestimento del grappolo	48
5.6.2	Espulsione della cera	49
5.6.3	Sinterizzazione	49
5.6.4	Costo totale del guscio	49
5.6.5	Costo di fusione del metallo	49
5.7	Costo del metallo liquido pronto da colare	52
5.8	Costo di colata	52
5.9	Costo finale del materiale	52
5.10	Rottura del guscio	53
5.11	Pulizia	53
5.12	Taglio del grappolo	54

INDICE

6	Colata continua	57
6.1	Macchine di colata continua	57
6.2	Tipologie di colata continua	61
6.2.1	Colata continua verticale	61
6.2.2	Colata continua curva	62
6.3	Parametri di processo	63
6.4	Capacità produttiva	64
6.5	Controlli	67
6.6	Innovazioni	68
7	Bibliografia	73

Capitolo 1

Processo di fabbricazione dei getti

La fabbricazione per fusione è una delle tecniche più antiche ma anche più versatili per la realizzazione di oggetti di vario utilizzo, sia da lavorare successivamente sia da utilizzare direttamente.

La tecnica fusoria si divide essenzialmente nei seguenti passaggi:

- preparazione della forma;
- colata della lega nella forma;
- estrazione del pezzo;
- eventuale finitura e trattamenti termici.

I metodi di preparazione del getto o di formatura si distinguono in due gruppi:

- metodi di formatura a perdere: ogni forma può essere utilizzata per una sola colata e viene distrutta al momento dell'estrazione del pezzo;
- metodi di formatura in forma permanente: la forma viene progettata e realizzata in modo da potere essere utilizzata più volte.

1.1 Formatura a **PERDERE**

1.1.1 Formatura in Sabbia

La formatura in sabbia utilizza forme costituite da sabbia, generalmente silico-alluminati, ma anche cromite e zirconia, consolidate utilizzando legan-

CAPITOLO 1

ti di vario tipo. Le forme ottenute sono del tipo massivo e sono generalmente supportate da un sistema di staffatura. Spesso la superficie interna delle forme viene verniciata, per minimizzare reazioni e penetrazioni di metallo fuso nello spessore del materiale della forma. Il ciclo di formatura utilizza impianti fortemente automatizzati che possono produrre forme in linea con il processo di colata.

Tra i vari sistemi di preparazione della forma la formatura in sabbia è il più diffuso e versatile.

Impiegando forme in sabbia vengono prodotti getti in alluminio, magnesio, acciaio e ghisa con vari standard qualitativi, in funzione del processo di formatura utilizzato. Con tale tecnica è possibile produrre getti di grandissime dimensioni.

La fonderia in sabbia può essere del tipo:

- Green sand (al verde): utilizza leganti naturali di tipo argilloso e non prevede trattamenti di essiccazione delle forme;
- Dry sand: utilizza leganti naturali tipo pece e prevede trattamenti di essiccazione delle forme;
- Inorganic bonded sand: utilizza leganti organici o inorganici;
- Resin bonded sand: utilizza leganti organici generalmente di tipo fenolico.

I cicli di formatura che richiedono l'indurimento in forno possono utilizzare sia miscele di sabbie con resine e catalizzatore sia sabbie rivestite di resina come nel processo cronig. Le sabbie vengono compattate in casseforme riscaldate, con o senza compressione, nelle quali acquistano la forma grazie all'indurimento termico. Generalmente, dopo la formatura della cassaforma, viene effettuato un ulteriore trattamento in forno per completare l'indurimento.

Nell'indurimento con catalizzatore gassoso (a freddo) la reazione di solidificazione è indotta sia dal catalizzatore liquido, mescolato nella miscela sabbiosa, o diffondendo un gas o vapore reattivo nell'unità compattata. Tali sistemi di trattamento a freddo hanno accresciuto sempre più la loro importanza perché permettono di operare a temperature ambiente o quasi. Offrono un alto standard di precisione degli elementi della forma in una vasta gamma di dimensioni, a patto che i modelli siano rigidi e precisi.

1.1.2 Formatura Lost Foam

Il ciclo lost foam ha alcune caratteristiche che lo differenziano sostanzialmente dagli altri cicli di fonderia per gravità:

- la sabbia con cui è realizzata la forma unica non è legata con alcun legante e viene compattata per vibrazione;
- il modello del getto viene realizzato in polistirolo espanso e non viene rimosso dalla forma, ma viene distrutto durante il colaggio per evaporazione;
- non sono necessarie anime dato che le cavità sono riempite dalla sabbia durante la compattazione.

Il modello in polistirolo espanso del getto, prima di essere fissato nella cassaforma, viene generalmente rivestito per immersione, spruzzatura o verniciatura con uno slurry specifico che conferisce finitura e stabilità alla cavità, senza alterare eccessivamente la permeabilità della forma.

I modelli in polistirolo sono realizzati con lo stesso processo di produzione di elementi d'imballaggio, ma il modello finale è ottenuto assemblando per incollaggio più parti realizzate separatamente.

Il ciclo lost foam presenta alcuni considerevoli vantaggi:

- realizzazione della forma semplice e veloce, senza impiego di anime e in blocco unico;
- possibilità di riutilizzo interno delle sabbie senza particolari trattamenti;
- possibilità di colaggio di diversi metalli (leghe di Al, Cu, ghisa e acciaio), senza particolari cambiamenti del ciclo di formatura se non nella densità del modello;
- assenza di limiti nella geometria del getto imposti da esigenze di formatura o dalla complessità delle anime.

1.1.3 Formatura a Guscio

La formatura a guscio (shell molding) utilizza prevalentemente forme metalliche in acciaio o in ghisa grigia, realizzate in officina per lavorazioni meccaniche. In alcuni casi la forma può essere realizzata in grafite, ma in questo caso la veloce usura, anche a causa della facile ossidazione del carbonio, limita la durata della forma stessa. Le anime possono essere realizzate in materiale

CAPITOLO 1

refrattario (sabbia, gesso o grafite), quando complesse, o metallico.

Il colaggio in conchiglia è limitato nell'impiego da almeno tre fattori:

- l'elevato costo di costruzione della forma è giustificato solo nel caso di grandi volumi produttivi (fino a 200000 getti nel caso dell'alluminio);
- non tutti i materiali metallici sono colabili in conchiglia, soprattutto quelli ferrosi, tra i quali possono essere utilizzate solo le ghise grigie;
- non sono realizzabili getti di forma troppo complessa a causa della difficoltà nella realizzazione della forma.

Il colaggio avviene in forme preriscaldate per evitare problemi di riempimento. Le forme sono di solito rivestite internamente, a spruzzo o a pennello, per minimizzarne l'usura, per evitare l'incollaggio del getto alla forma e per facilitarne il riempimento.

In conchiglia vengono prodotti getti in alluminio, magnesio, rame, zinco e ghisa ipereuttetica. Esempi tipici sono le testate di piccoli motori ed i cerchioni in lega d'alluminio.

1.2 Formatura a forma PERMANENTE

1.2.1 Formatura da liquido per colata in conchiglia per gravità

La colata in conchiglia per gravità è la tecnologia fusoria che prevede la colata del metallo fuso in uno stampo generalmente in acciaio. Il riempimento e la solidificazione del materiale avvengono sotto la legge di gravità e questo rende possibile l'utilizzo di tasselli e anime in sabbia.

Lo stampo, o conchiglia, può essere suddiviso in due o più parti nel caso, rispettivamente, di pezzi che presentino un unico o più piani di divisione. In alcuni casi, ovvero quando è possibile risolvere il controsformo con un movimento aggiuntivo limitato a una sola parte dello stampo, si utilizzano ulteriori parti metalliche mobili rispetto al solo semistampo, che prendono il nome di anime o maschi. Quando ciò non è possibile si possono adottare tasselli e anime in sabbia per consentire o semplificare la costruzione dell'attrezzatura.

Lo stampo o conchiglia può essere utilizzato ripetutamente. Gli eventuali tasselli e anime in sabbia vengono invece distrutti durante l'operazione di sterratura del getto.

PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEI GETTI

I principali materiali utilizzati per la fusione in conchiglia a gravità sono:

- leghe di alluminio;
- leghe di magnesio;
- leghe del rame;
- leghe di zinco.

È altresì possibile utilizzare leghe ferrose, in particolare ghise grigie ipereutettiche, anche se si hanno delle complicazioni dovute all'alta temperatura di fusione.

La fonderia in conchiglia a gravità prevede un ciclo di produzione suddiviso nelle seguenti fasi:

- colata;
- solidificazione;
- apertura dello stampo;
- estrazione del getto;
- ripristino;
- eventuale ramolaggio;
- chiusura dello stampo.

Gli stampi, prima di procedere con la colata, vengono rivestiti con sottili strati di materiali refrattari; a tale scopo si utilizzano vernici a base acquosa e si applicano a caldo.

Il rivestimento refrattario ha un ruolo importante in tutte le fasi del processo produttivo. Durante il riempimento deve limitare la perdita di calore del materiale fuso grazie alla natura refrattaria e quindi consentire il riempimento della cavità senza che abbia inizio la solidificazione. In fase di solidificazione deve consentire un controllo della velocità di raffreddamento e favorire la solidificazione direzionale. Infine, durante la fase di estrazione, deve facilitare l'espulsione del getto dalla conchiglia grazie a un'azione di lubrificazione allo stato solido.

CAPITOLO 1

1.2.2 Colata in conchiglia a bassa pressione

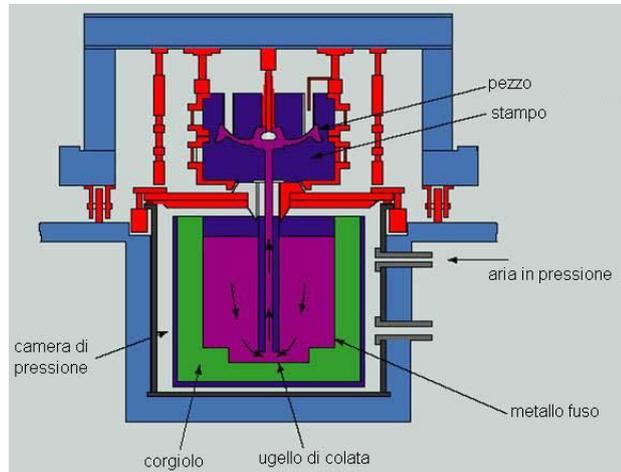


Figura 1.1: Schema dell'impianto di colata in conchiglia a bassa pressione.

Nell'impianto per la colata in bassa pressione la lega fusa è contenuta in un crogiolo a tenuta ermetica, riscaldato a induzione. Mediante aria compressa (0,2-0,7 atm) il metallo è spinto attraverso un condotto nella conchiglia posta superiormente. La pressione è mantenuta per 10-15 minuti, a seconda delle dimensioni del getto, finché la lega si sia solidificata nella forma; il metallo che rimane liquido nell'attacco di colata e nel tubo verticale ritorna nel crogiolo cessata l'azione della pressione. La forma può essere riscaldata a una temperatura perfino doppia di quella adottata normalmente nella colata in conchiglia; ciò consente un riempimento migliore della forma e quindi l'ottenimento di getti più compatti e dettagliati.

Le conchiglie sono progettate in modo che la lega colata si raffreddi progressivamente, partendo dal punto più lontano verso l'attacco. L'altezza del tubo di iniezione è ridotta al minimo e, se possibile, l'attacco è applicato alla parte più massiccia del getto. Raffreddatori di rame possono essere adottati per garantire un raffreddamento progressivo; allo stesso scopo la sezione della conchiglia può essere variata in modo da renderla più spessa nella zona corrispondente alla parte più massiccia del getto.

I principali vantaggi del nuovo procedimento di iniettofusione:

- maggior rendimento;
- eccezionale compattezza del getto;

PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEI GETTI

- la spesa per l'impianto è inferiore a quella di un impianto normale di pressofusione;
- la finitura superficiale è buona, con riprese meno frequenti di quelle che si verificano con altri sistemi.

Il processo risulta comunque economico soltanto per serie di almeno 5.000 pezzi.

1.3 Colata per Centrifugazione

1.3.1 Centrifugazione Orizzontale

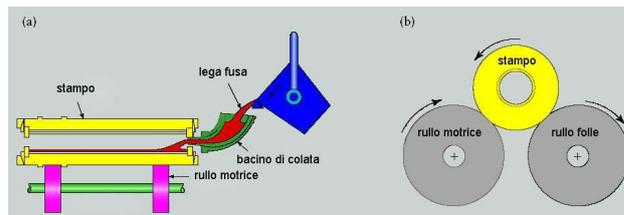


Figura 1.2: Schema dell'impianto di colata per centrifugazione.

È usata per il getto di pezzi aventi un asse di rivoluzione. La tecnica sfrutta la forza centrifuga causata dalla rotazione dello stampo.

Le varie fasi dell'operazione sono:

- la lega viene versata da una siviera nel bacino di colata;
- il bacino di colata è normalmente composto da un involucro in lamiera rivestito internamente da materiale refrattario e permette alla lega di raggiungere lo stampo;
- lo stampo (o conchiglia) è un tubo normalmente in acciaio che appoggia su due coppie di rulli, di cui uno motore che trasmette la rotazione;
- alle due estremità dello stampo si trovano due tappi che impediscono alla lega di uscire. Detti tappi sono forati al centro; quelli opposti alla colata per permettere la fuoriuscita dell'aria, gli altri per permettere il passaggio del becco di colata.

CAPITOLO 1

1.3.2 Centrifugazione Verticale

Il range di utilizzo della centrifugazione verticale è considerato molto ampio, i pezzi possono essere non simmetrici e non cilindrici e questo permette un utilizzo più ampio di questa tecnica di colata.

1.4 Pressofusione (Die Casting)

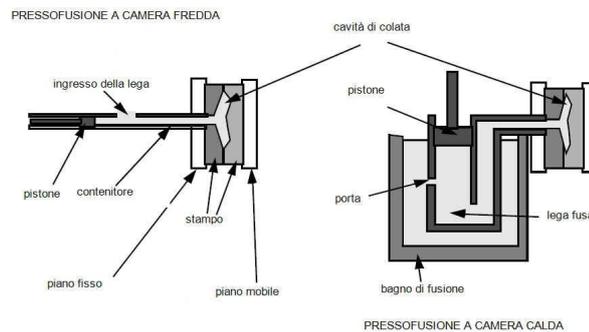


Figura 1.3: Schema dell'impianto di pressofusione.

La pressofusione utilizza stampi in acciaio realizzate per lavorazione meccanica, nei quali il metallo fuso viene spinto da un pistone che imprime ad esso un'elevata velocità (anche 100 volte superiore a quella della colata per gravità). Il processo può essere del tipo a **camera calda**, con il pistone inserito nella stessa camera dove è contenuto il metallo fuso, o a **camera fredda**, con il pistone che riceve la quantità dosata del metallo fuso da un crogiolo. Il ciclo di colata, solidificazione e formatura del getto è brevissimo (pochi secondi). Il processo, dato soprattutto l'elevatissimo costo di realizzazione dello stampo, viene impiegato solo per produzioni elevate, dell'ordine delle decine e centinaia di migliaia di pezzi.

La pressione esercitata sul metallo fuso durante la solidificazione consente un veloce scambio termico con lo stampo, raffreddato ad acqua con circuiti interni, e dunque velocità di raffreddamento elevate. I getti presso fusi sono perciò caratterizzati dall'aver una struttura dendritica e cristallina molto più fine dei getti colati in gravità. La stessa pressione consente anche alla frazione liquida di compensare il ritiro di solidificazione, minimizzando la formazione di porosità da ritiro.

Di contro l'elevata velocità d'iniezione del metallo fuso nello stampo genera un flusso ad elevata turbolenza, ponendo problemi di assorbimento di gas e

di rifusione incompleta della pellicola formata a contatto con la superficie dello stampo e strappata da questa dal moto turbolento.

Lo stampo è costituito da due semistampi (portastampo e matrice). Un semistampo è assemblato alla piastra fissa dell'impianto, solidale con la struttura portante, mentre l'altra parte è montata sulla piastra mobile, movimentata attraverso un pistone idraulico. L'architettura tradizionale dell'impianto prevede un sistema di bloccaggio in fase di chiusura tramite un meccanismo a ginocchiera, il quale ha lo scopo di scaricare le forze che tendono ad aprire lo stampo durante l'iniezione e la pressatura del metallo liquido.

Il processo di pressofusione viene utilizzato per la produzione di getti in lega leggera (alluminio, magnesio, zinco) e in rame (bronzi e ottoni), generalmente con spessore piccolo o medio.

1.5 Formatura allo stato Semisolido

La pressofusione in semisolido, detta anche rheocasting o tixocasting, sfrutta le proprietà tixotropiche di materiali preparati con tecniche speciali. Tali materiali, a temperature comprese nell'intervallo di solidificazione, nonostante presentino la consistenza di un solido estremamente plastico, se sollecitate meccanicamente presenteranno una viscosità vicina a quella del liquido.

Materiali tixotropici possono essere utilizzati come carica dell'impianto di pressofusione, utilizzando una billetta preriscaldata ad una temperatura compresa tra le T_s e T_l , invece del metallo fuso. In tali condizioni la billetta, sottoposta alla pressione del pistone si comporterà come un liquido entrando nella cavità dello stampo.

Dal punto di vista del processo, il fatto di iniettare un materiale ad una temperatura più bassa rappresenta un grosso vantaggio perché allunga notevolmente la durata dello stampo.

Dal punto di vista metallurgico, la temperatura più bassa d'iniezione (inferiore a quella di liquidazione) riduce il ritiro di solidificazione limitando la formazione di porosità da ritiro e genera velocità di solidificazione maggiori a tutto vantaggio della struttura cristallina.

Il principale svantaggio di tale processo è rappresentato dalla scarsa disponibilità sul mercato di billette prodotte con tale struttura.

Il processo di fusione in semisolido è, per ora, utilizzato solo per la produzione di getti in lega d'alluminio.

1.6 Squeeze Casting

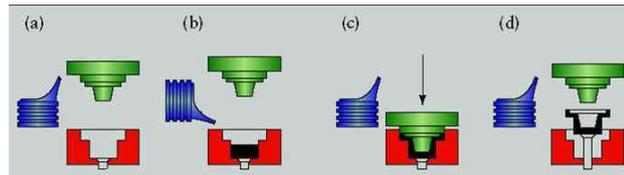


Figura 1.4: Schema dell'impianto di squeeze casting.

Il processo di squeeze casting, rispetto alla pressofusione, sostituisce all'iniezione del metallo fuso nello stampo chiuso, il colaggio del fuso nello stampo aperto; solo dopo il riempimento del semistampo inferiore viene chiuso lo stampo esercitando una pressione sul liquido, costringendolo prima a riempire tutta la cavità e poi a solidificare.

Il getto prodotto in queste condizioni risulta essere di bassissima difettosità interna (assenza di turbolenza durante il riempimento e ritiro di solidificazione compensato dalla graduale chiusura dello stampo) e di struttura cristallina estremamente fine (temperatura di colaggio di poco superiore a quella di liquidus).

Il processo è adattabile anche a leghe non da fonderia, ma ha lo svantaggio di poter essere applicato solo a geometrie non troppo complesse.

Le fasi da seguire per lo Squeeze Casting sono:

- inserimento della lega liquida nella cavità;
- chiusura dello stampo e applicazione della pressione;
- evacuazione dello stampato.

1.7 Mirofusione

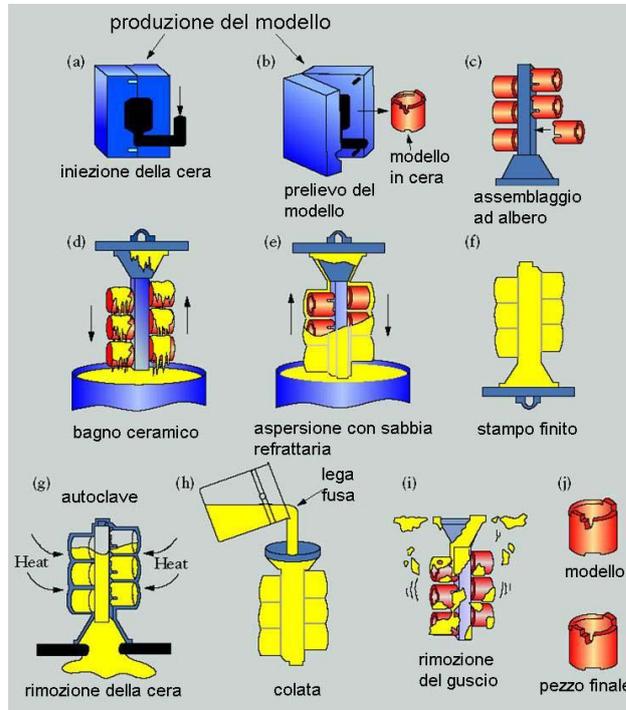


Figura 1.5: Schema dell'impianto di microfusione.

L'attività di fusione a cera persa è intesa come trasformazione, per mezzo di fusione e colata, di una lega metallica in un prodotto semi-finito o finito. La microfusione è adatta alla produzione di serie piccole o medio alte. È concettualmente diversa dalla così detta fonderia convenzionale, sia per criteri operativi sia metodologici, poiché non contempla l'impiego di modelli permanenti sistemati su placca, forme in sabbia, conchiglie a gravità ecc., ma si concretizza invece nell'allestimento di un modello di cera, preciso e dettagliato.

CAPITOLO 1

Capitolo 2

Aspetti Economici della Fonderia

I processi di fusione si differenziano per le soluzioni tecnologiche utilizzate e per l'entità dell'intervento umano richiesto, per il costo delle attrezzature e per il tempo necessario al completamento del processo. In tabella sono indicati qualitativamente i pesi relativi di forme, attrezzature e lavoro umano sul costo finale del prodotto.

Processo di Colata	Forma-stampo	Attrezzatura	Lavoro umano	Cadenza Produttiva [pezzi/h]
sabbia	basso	basso	medio-basso	fino a 20
conchiglia transitoria	medio-basso	medio-alto	medio-basso	fino a 50
modello sacrificale	medio-alto	medio-basso	alto	fino a 1000
gravità, conchiglia permanente	medio	medio	medio-basso	fino a 60
in alta pressione	alto	alto	medio-basso	fino a 200
centrifuga	medio	alto	medio-basso	fino a 50

Tabella 2.1: Pesi relativi di forme, attrezzature e lavoro umano rispetto al costo finale del prodotto.

La preparazione di forme temporanee o permanenti per la colata richiede materiale grezzo, tempo e lavoro che vengono traslati nei costi di produzione. Ai due estremi si trovano la colata in sabbia e la colata in stampo ad alta pressione, che richiede un uso rilevante delle macchine utensili. Chiaramente il materiale prima di essere colato deve essere fuso, quindi sul costo dell'oggetto intervengono il costo dei dispositivi di fusione e degli accessori, l'entità di automazione e il costo dell'energia. Infine, influenzano il costo del getto la finitura e l'ispezione. La quantità di lavoro richiesta per queste operazioni varia notevolmente in funzione del processo e del livello di automazione. All'opposto, la colata in alta pressione è normalmente automatizzata e rag-

CAPITOLO 2

giunge un'alta cadenza produttiva con un intervento umano relativamente basso. Il costo dell'attrezzatura imputabile al singolo pezzo diminuisce all'aumentare del numero delle parti prodotte, quindi per serie rilevanti diventa conveniente ricorrere a soluzioni produttive che richiedano costi elevati in termini di investimenti. Chiaramente questo discorso vale in termini generali, quando cioè non esistono vincoli predefiniti sulla tolleranza dimensionale e di forma e sulla finitura superficiale richiesta.

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche dei vari processi. I valori indicati hanno carattere orientativo per la determinazione del campo di utilizzo; i valori reali possono presentare discrepanze da quanto riportato in funzione della specifica tecnologia adottata.

Processo di Colata	Materiale lavorato	P_{min} [kg]	P_{max} [kg]	Finitura [μm]	Porosità*	Geometria*	Precisione Dimensionale*	S_{min} [mm]	S_{max} [mm]
sabbia	tutti	0.05	-	5-25	4	1-2	3	3	-
conchiglia transitoria	tutti	0.05	100	1-3	4	2-3	2	2	-
modello sacrificale	tutti	0.005	100	1-3	3	1	1	1	75
consiglia permanente	tutti	0.5	300	2-3	2-3	3-4	1	2	50
in alta pressione	leghe Al,Mg,Zn,Cu	<0.05	50	1-2	1-2	3-4	1	0.5	12
centrifuga	tutti	-	5000	2-10	1-2	3-4	3	2	100

Tabella 2.2: Caratteristiche dei vari processi; *1=migliore, 5=peggiore.

2.1 Criteri di scelta di una soluzione produttiva

Sicuramente la scelta di una soluzione produttiva dipende da molteplici aspetti: tecnologici, economici, di tempo. Tuttavia, una rapida indicazione sui costi si può ottenere da una valutazione di massima facilmente realizzabile. È evidente che un'analisi dettagliata dei costi richiede una trattazione molto più ampia, come dimostrato anche dal fatto che si stanno sempre più diffondendo software specifici per l'analisi dei costi. In ogni caso l'indicazione di massima preserva una sua validità, almeno a livello orientativo.

Il costo orientativo si calcola come:

$$C = C_m + \frac{C_c}{n} + \frac{C_L}{n'} \quad ; \quad (2.1.1)$$

dove:

- C: costo dell'unità di prodotto (costo/pezzo);

ASPETTI ECONOMICI DELLA FONDERIA

- C_m : costo del materiale;
- C_c : costo del capitale;
- C_L : costo del lavoro;
- n : numero di pezzi prodotti;
- n' : cadenza produttiva oraria (prezzi/ora).

Processo di Colata	sabbia	stampo bassa pressione	conchiglia	stampo alta pressione
C_m	1	1	1	1
C_L	20	20	20	20
C_c	0.9	4.4	700	3000
n'	6.25	22	10	50

Tabella 2.3: Costo del processo espresso in unità fittizia w .

Per quanto riguarda la scelta del tipo di processo da attuare è possibile fare le seguenti considerazioni:

- la colata in stampo a bassa pressione è probabilmente la soluzione più idonea per la produzione della preserie;
- per la produzione della commessa la colata in stampo ad alta pressione è probabilmente la più idonea.

L'oggetto da produrre, in ogni caso, deve essere dimensionato in modo da favorire la solidificazione direzionale, minimizzare i costi di attrezzaggio e ridurre i fattori di concentrazione delle tensioni. Occorre inoltre tenere conto di come la lega scelta fluisce e riempie la forma, per evitare moti turbolenti.

2.2 Aspetto Energetico

Nel 2000 il costo medio dell'energia negli USA per i prodotti ottenuti per fusione era pari al 10% del valore del materiale, raggiungendo il 12% per i metalli ferrosi e il 6% per metalli non ferrosi.

Nella figura è riportata la distribuzione percentuale del costo energetico per il processo produttivo. Gli obiettivi da raggiungere risultano essere:

- aumento dell'efficienza nell'utilizzo dell'energia nei processi di fusione;

CAPITOLO 2

- aumento dell'efficienza nei processi di colata mediante la spinta verso tecnologie che intervengano sul ritiro in fase di colata, diminuendo di conseguenza la quantità di materiale da rifondere. Di fatto, una spinta verso lo sviluppo di processi net shape o near net shape;
- realizzazione di stampi con una maggiore vita utile;
- utilizzo diffuso di sistemi di simulazione;
- diminuzione sostanziale delle emissioni di inquinanti in atmosfera.

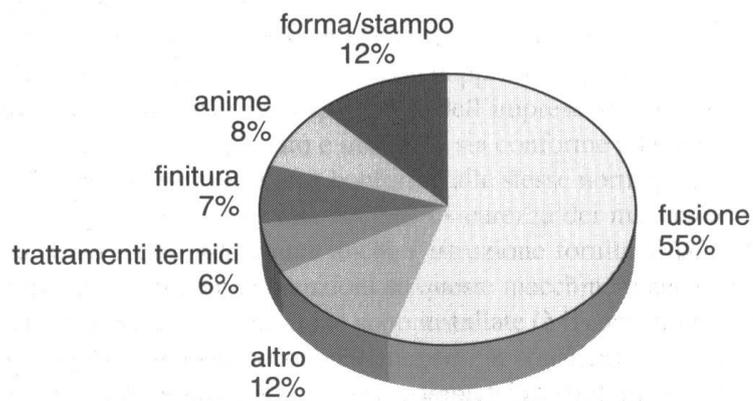


Figura 2.1: Distribuzione del costo energetico per il processo produttivo.

Capitolo 3

Design per Die Casting

3.1 Materiali

I quattro tipi di lega più utilizzati per questo tipo di processo sono leghe a base di zinco, di alluminio, di magnesio e di rame. Le caratteristiche meccaniche e il costo di tali leghe sono riportate nella tabella seguente:

tipo di lega	peso specifico	resistenza a trazione [MN/m ²]	modulo di elasticità [GN/m ²]	costo [\$/kg]
zamak (Zn)	6.6	220	66	1.78
zamak5 (Zn)	6.6	270	73	1.74
A13 (Al)	2.66	130	130	1.65
A360 (Al)	2.74	170	120	1.67
ZA8 (Zn-Al)	6.3	290	86	1.78
ZA27 (Zn-Al)	5	370	78	1.94
silicon brass 879 (Cu)	8.5	240	100	6.6
Mn bronzo 865 (Cu)	8.3	190	100	6.6
AZ91B (Mn)	1.8	150	45	2.93

Tabella 3.1: Leghe per die casting.

Per le principali leghe si hanno le seguenti caratteristiche:

- leghe di Alluminio:

- pro: bassa densità, ottima resistenza alla corrosione, relativamente facili da fondere, buone caratteristiche meccaniche e stabilità dimensionale;
- contro: richiedono l'uso di macchine a camera fredda, con tempi di ciclo più lungo rispetto alle macchine a camera calda;

CAPITOLO 3

- leghe di Zinco:

- pro: facili da lavorare, alta duttilità e buona resistenza. Si possono eseguire getti con pareti molto sottili, con superfici ben finite e pronte per essere placcate o dipinte;
- contro: molto suscettibili alla corrosione; l'alto peso specifico ne aumenta il prezzo per unità di volume;

- leghe di Rame:

- contro: breve durata della colata a causa dello stress termico degli stampi e delle temperature di fusione estremamente elevate.

Un'approssimazione della vita media degli stampi, in funzione della lega utilizzata, si ha con la seguente tabella:

Lega	Vita stampo
Zinco	500000
Zinco-Alluminio	500000
Alluminio	100000
Magnesio	180000
Rame	15000

Tabella 3.2: Numero di utilizzi dello stampo.

3.2 Macchine per il Die Casting

Le macchine per il die casting risultano essere composte da vari elementi: sistema di montaggio e fissaggio dello stampo, stampo, impianto di pompaggio del metallo fuso e sistema di iniezione, impianto di fusione e ancora gli accessori ausiliari per la meccanizzazione delle operazioni di estrazione e lubrificazione dello stampo.

Si riportano ora alcuni dati riguardanti i sistemi di colata e camera calda e fredda rispettivamente:

DESIGN PER DIE CASTING

Forza di chiusura [kN]	Volume da iniettare [cm ³]	Rapporto di esercizio [\$/h]	Tempo di essiccazione [s]	Max. apertura stampo [cm]	Dimensione piastre [cm]
900	750	58	2.3	20.0	48x56
1150	900	60	2.5	23.0	56x64
1650	1050	62	2.9	25.0	66x70
2200	1300	64	3.3	31.0	70x78
4000	1600	70	4.6	38.0	78x98
5500	3600	73	5.6	45.7	100x120
6000	4000	76	6.2	48.0	120x150
8000	4000	86	7.5	53.0	1120x150

Tabella 3.3: Sistema a camera Calda.

Forza di chiusura [kN]	Volume da iniettare [cm ³]	Rapporto di esercizio [\$/h]	Tempo di essiccazione [s]	Max. apertura stampo [cm]	Dimensione piastre [cm]
900	305	66	2.2	24.4	48x64
1800	672	73	2.8	36.0	86x90
3500	1176	81	3.9	38.0	100x108
6000	1932	94	5.8	46.0	100x120
10000	5397	116	8.6	76.0	160x160
15000	11256	132	10.2	81.0	210x240
25000	11634	196	19.9	109.0	240x240
30000	13110	218	23.3	119.0	240x240

Tabella 3.4: Sistema a camera Fredda.

3.3 Finitura

A seguito della sbavatura, il prodotto deve essere lucidato e o ricoperto per prevenirne la corrosione, l'usura e per migliorarne l'aspetto.

Il costo dei trattamenti superficiali è spesso rappresentato come costo per area di superficie trattata. Nella tabella seguente vengono quindi riportati i costi tipici dei principali trattamenti superficiali:

CAPITOLO 3

Processo di finitura	Costo per 50 cm ² di superficie [cents]
sostanze impregnanti	1.8
placcatura Cu/Ni/Cr	4.5
lucidatura	1.3
anodizzazione	1.6
materia prima	2.1
pittura finita	2.4

Tabella 3.5: Costi dei più comuni processi di finitura.

3.4 Determinazione dell'ottimale numero di cavità

Il costo del processo di pressofusione è prodotto dai costi relativi ai tempi del ciclo e dal valore di gestione delle macchine e degli operatori.

A questo punto si procede con il calcolo del numero ottimale di cavità dello stampo. Tale valore è uguale al numero di aperture dello stampo.

Il numero ottimale di cavità dello stampo si determina con la seguente analisi:

$$C_t = C_{cd} + C_{tr} + C_{dn} + C_{tn} + C_{ta} \quad [\$]; \quad (3.4.1)$$

dove:

C_t : costo totale di tutti i componenti necessari alla produzione, [\\$];

C_{cd} : costo del processo di die casting, [\\$];

C_{tr} : costo del processo di taglio, [\\$];

C_{dn} : costo dello stampo per die casting a multicavità, [\\$];

C_{tn} : costo multiaperture trim die, [\\$];

C_{ta} : costo della lega, [\\$].

Il costo del processo di die casting C_{cd} è il costo di esercizio di una macchina per il die casting di misura adeguata ed è rappresentabile mediante l'equazione:

$$C_{cd} = \frac{N_t}{n} C_{rd} t_d \quad ; \quad (3.4.2)$$

dove:

N_t : numero totale di componenti da gettare;

n : numero di cavità;

C_{rd} : costo orario operativo, [\$/h];

DESIGN PER DIE CASTING

t_d : tempo del ciclo di die casting.

Per il costo orario dell'operativo si ha:

$$C_{rd} = k_1 + m_1 F \quad ; \quad (3.4.3)$$

dove:

F : forza di chiusura, [kN];

k_1, m_1 : coefficienti di macchina

Mediante una regressione lineare dei dati precedentemente riportati in tabella si è arrivati a stimare i valori:

-camera calda: $k_1=55.4, m_1=0.0036$;

-camera fredda: $k_1=62.0, m_1=0.0052$.

Per il costo di taglio si ha:

$$C_{tr} = \frac{N_t}{n} C_{rt} t_p \quad ; \quad (3.4.4)$$

dove:

C_{rt} : quota pressa di taglio e operatore, [\$/h];

t_p : tempo del ciclo di taglio, [h].

In questa analisi, la quota oraria di taglio è approssimata tramite un valore costante per tutte le varie dimensioni delle presse. Questo lo si può fare perché il costo delle presse di taglio è relativamente basso viste le piccole forze necessarie.

Per il tempo di ciclo si ha:

$$t_p = t_{p0} + n \delta_{tp} h \quad ; \quad (3.4.5)$$

dove:

t_{p0} : tempo del ciclo per un singolo ciclo di apertura per un singolo pezzo;

δ_{tp} : tempo addizionale per multiaperture di taglio, prevalentemente dato dall'aumento del tempo dovuto alla fusione in cavità.

Per il costo delle multicavità si ha:

$$C_{dn} = C_{d1} n^m \quad ; \quad (3.4.6)$$

dove:

C_{d1} : costo dello stampo ad una singola cavità;

CAPITOLO 3

m : esponente dello stampo multi cavità, solitamente si pone $m = 0.7$;
 n : numero di cavità.

Per il costo di multiaperture si ha:

$$C_{tn} = C_{t1}n^m \quad ; \quad (3.4.7)$$

dove:

C_{t1} : costo singola apertura;

m : esponente di costo delle aperture multiple di taglio, uguale per tutte le cavità.

Per il costo totale della lega si ha:

$$C_{ta} = N_t C_a \quad ; \quad (3.4.8)$$

dove:

C_a : costo della lega per ogni getto.

Dalle espressioni precedenti si ricava:

$$C_t = \frac{N_t}{n} (k_1 + m_1 F) t_d + \frac{N_t}{n} (t_{p0} + n \Delta t_p) C_{rt} + (C_d + C_t) n^m + N_t C_a \quad ; \quad (3.4.9)$$

Per la forza di serraggio della macchina si ha:

$$F = n f \quad ; \quad (3.4.10)$$

dove:

F : forza di chiusura della macchina per die casting, [kN];

f : forza per singola cavità, [kN].

Ricavando n dall'equazione precedente, sostituendo e riarrangiando si ottiene:

$$C_t = N_t \frac{k_1 f}{F} t_d + N_t C_{rt} t_{p0} \frac{f}{F} + N_t C_{rt} \Delta t_p + (C_d + C_t) \left(\frac{F}{f} \right)^m + N_t C_a \quad ; \quad (3.4.11)$$

Per determinare il numero di cavità avente minor costo a parità di grandezza della macchina, occorre derivare l'equazione 3.4 rispetto alla forza di chiusura F e porla uguale a 0:

$$\frac{dC_t}{F} = N_t f \frac{k_1 t_d + C_{rt} t_{p0}}{F^2} + m F^{m-1} \frac{C_d + C_t}{f^m} = 0 \quad ; \quad (3.4.12)$$

riarrangiando:

$$n^{m+1} = \frac{N_t (k_1 t_d + C_{rt} t_{p0})}{m (C_d + C_t)} \quad . \quad (3.4.13)$$

Il valore n^{m+1} risulta essere il numero di cavità di stampo più economico per un qualsiasi lavoro di die casting.

3.5 Determinazione dell'appropriata grandezza della macchina

Durante la scelta della grandezza appropriata della macchina devono essere considerati svariati fattori. Questi fattori comprendono le prestazioni della macchina e le limitazioni dimensionali imposte. La più importante proprietà della macchina è la forza di serraggio. I fattori dimensionali da considerare sono: il volume di metallo da iniettare, l'ingombro dato dall'apertura dello stampo e l'area delle piastre.

3.5.1 Forza di serraggio

Le macchine per la pressofusione sono prima di tutto classificate per mezzo della forza di serraggio.

Per evitare la divisione dello stampo durante l'iniezione della lega, la forza di serraggio deve contrastare la forza di separazione f :

$$F > f \quad ; \quad (3.5.1)$$

dove:

$$f = \frac{p_m A_{pt}}{10} \quad ; \quad (3.5.2)$$

in cui:

f : forza esercitata dal metallo fuso sullo stampo, [kN];

p_m : pressione del metallo fuso nello stampo, [MPa];

A_{pt} : area totale occupata dal metallo fuso nello stampo, [cm²].

Per il calcolo dell'area A_{pt} si ha l'equazione:

$$A_{pt} = A_{pc} + A_{po} + A_{pf} \quad ; \quad (3.5.3)$$

dove:

A_{pc} : area prevista per le cavità;

CAPITOLO 3

A_{po} : area prevista per i pozzi di traboccamento;
 A_{pt} : area prevista per il sistema di alimentazione.

Un valore medio dell'area totale del getto può essere ottenuto dall'equazione:

$$A_{pt} \simeq 1.75A_{pc} \quad ; \quad (3.5.4)$$

tale formula può quindi essere utilizzata come prima stima della forza di serraggio.

Vengono ora riportati alcuni valori tipici:

Lega	Pressione [MN/m ²]
Zinco	21
Alluminio	48
ZA	35
Rame	40
Magnesio	48

Tabella 3.6: Pressioni tipiche in pressofusione.

3.5.2 Volume iniettato

Il volume da iniettare per un particolare processo di pressofusione risulta essere:

$$V_s = V_c + V_0 + V_f \quad [cm^3]; \quad (3.5.5)$$

dove:

V_s : volume totale iniettato;

V_c : volume delle cavità;

V_0 : volume dei pozzi di traboccamento;

V_f : volume del sistema di riempimento.

Dalle relazioni di Blum si ottiene:

$$V_0 = \frac{0.8V_c}{h^{1.25}} \quad [cm^3]; \quad (3.5.6)$$

$$V_f = \frac{V_c}{h} \quad [cm^3]; \quad (3.5.7)$$

dove h è lo spessore medio della parete misurata in [mm].

È altresì possibile utilizzare l'equazione semplificata:

$$V_0 = V_c \left(1 + \frac{2}{h} \right) \quad [cm^3]. \quad (3.5.8)$$

Da notare che per spessori $h = 1 \div 10$ mm la differenza tra le varie relazioni è dell'ordine del $4 \div 7\%$.

3.5.3 Restrizioni dimensionali della macchina

Per un pezzo che deve essere fuso con una specifica macchina le condizioni principali da soddisfare sono:

-adeguata apertura massima dello stampo L_s , atta a garantire l'apertura delle ganasce di serraggio e l'estrazione del getto senza interferenze; pertanto bisogna garantire un gioco di almeno 120 mm:

$$L_s = 2D + 12 \quad [cm]; \quad (3.5.9)$$

dove D è la profondità di ogni cavità;

-area tra gli angoli della barra di chiusura dell'unità di serraggio, sia sufficiente per inserire lo stampo desiderato. Il gioco tra cavità adiacenti o tra cavità e piastra deve essere almeno di 7.5 cm con un aumento di 0.5 cm ogni 100 cm^2 di area della cavità. Una stima ragionevole della grandezza della piastra si ha aggiungendo il 20% alla larghezza della pareti e 12.5 cm allo spessore della piastra per il canale di colata e sistema di alimentazione.

3.6 Stima del tempo del ciclo di pressofusione

Il ciclo macchina della pressofusione consta dei seguenti passaggi:

- versamento del metallo da iniettare nel manicotto di iniezione (solo nelle macchine a camera fredda);
- iniezione del metallo fuso nel sistema di riempimento, cavità e pozzi di traboccamento;
- raffreddamento del metallo;
- apertura dello stampo;

CAPITOLO 3

- estrazione del getto;
- lubrificazione delle superfici dello stampo;
- chiusura dello stampo e successivo ciclo.

3.6.1 Versamento della lega fusa

Il tempo di un versamento manuale del metallo liquido nella macchina a camera fredda varia a seconda del volume da versare e si può rappresentare abbastanza precisamente con la formula:

$$t_{lm} = 0.0048V_s \quad [s]; \quad (3.6.1)$$

dove:

t_{lm} : tempo di versamento manuale;

V_s : volume totale da iniettare, [cm³].

3.6.2 Iniezione del metallo

L'iniezione del metallo e il risultante riempimento del sistema di alimentazione, delle cavità e dei pozzi di traboccamento, deve essere fatta in modo estremamente rapido. Questo per evitare una solidificazione prematura, che provoca a sua volta un incompleto riempimento della cavità o causa difetti di fabbricazione del getto. È chiaro che il problema della solidificazione prematura è maggiore nella pressofusione di getti sottili.

Valore del tempo di riempimento raccomandato risulta essere:

$$t_f = \frac{0.035h(T_i + T_l + 61)}{T_i - T_m} \quad [s]; \quad (3.6.2)$$

dove:

t_f : tempo di riempimento del sistema di riempimento, delle cavità e dei pozzi di traboccamento, [s];

T_i : temperatura raccomandata di iniezione della lega, [°C];

T_l : temperatura del liquidus, [°C];

T_m : temperatura dello stampo prima dell'iniezione, [°C];

h : media dello spessore del getto, [mm].

Valori tipici risultano essere:

Lega	T_i [°C]	T_l [°C]	T_m [°C]	T_e [°C]
Zinco	440	387	175	300
Alluminio	635	585	220	385
ZA	460	432	215	340
Rame	948	927	315	500
Magnesio	655	610	275	430

Tabella 3.7: Temperature tipiche.

3.6.3 Raffreddamento del metallo

Una volta riempire lo stampo, si fa raffreddare il getto fino alla temperatura di espulsione T_e ; il calore viene rimosso dallo stampo tramite la circolazione di acqua di raffreddamento.

Durante il raffreddamento il metallo rilascia il calore latente di fusione; tale calore addizionale può essere rappresentato dall'equivalente aumento di temperatura ΔT dato da:

$$\Delta T = \frac{H_f}{H_s} \quad ; \quad (3.6.3)$$

dove:

H_t : calore latente di fusione, [J/kg];

H_s : calore specifico, [J/(kg K)].

Si può quindi ricavare l'equivalente temperatura di iniezione:

$$T_{ir} = T_i + \Delta T \quad . \quad (3.6.4)$$

Si può ora calcolare il valore del flusso di calore nella superficie dello stampo:

$$\dot{W} = H_t A (T - T_m) \quad ; \quad (3.6.5)$$

dove:

T : temperatura della lega vicino alla parete dello stampo, [°C];

T_m : temperatura dello stampo vicino alla parete, [°C];

A : area di contatto con la superficie dello stampo, [m²];

H_t : coefficiente di trasmissione termico, [kW/(m²K)];

\dot{W} : flusso di calore, [kW].

Secondo gli studi di Dewhurst e Blum si ha che il tempo di raffreddamento è rappresentabile come:

$$tc = \rho H_s \ln \left(\frac{T_{ir} - T_{im}}{T_e - T_m} \right) \frac{h_{max}}{2H_t} \quad ; \quad (3.6.6)$$

CAPITOLO 3

dove:

ρ : densità, [kg/m³];

H_s : calore specifico, [J/(kg K)];

T_{ir} : surriscaldamento, temperatura di iniezione, [°C];

T_m : temperatura della colata, [°C];

T_e : temperatura di espulsione del getto, [°C];

h_{max} : massimo spessore del getto, [mm];

H_t : coefficiente di trasmissione termica, [W/(m²K)].

3.6.4 Estrazione del getto e lubrificazione dello stampo

Quando lo stampo viene aperto, gli estrattori entrano nello stampo e spingono il getto, il sistema di alimentazione e i pozzi di traboccamento, nell'apertura tra i piatti e le cavità. Si assume che il tempo di estrazione aumenti linearmente con l'aumentare delle dimensioni del getto stesso, seguendo la legge:

$$t_x = 1 + 0.08(W + L) \quad [s]; \quad (3.6.7)$$

tale legge ha validità per dimensioni $W + L > 25 \text{ cm}$. Nell'equazione si ha:

t_x : tempo di estrazione;

W, L : altezza e larghezza del più piccolo rettangolo contenente il sistema di alimentazione, le cavità e i pozzi di traboccamento, [cm].

Il tempo di apertura e chiusura dello stampo si calcola come:

$$t_{open} + t_{close} = 1.75t_d \quad [s]; \quad (3.6.8)$$

dove:

t_d : tempo macchina a vuoto, [s].

3.6.5 Tempo del ciclo di taglio

Il tempo del ciclo di taglio comprende il tempo per il caricamento della macchina, questo tempo varia linearmente con la somma delle lunghezze e larghezze delle parti e si rappresenta come:

$$t_s = 3.6 + 0.12(L + W) \quad [s]; \quad (3.6.9)$$

Per una prima stima del tempo di taglio si può utilizzare l'equazione:

$$t_p = 5.4 + 0.18(L + W) \quad [s]; \quad (3.6.10)$$

3.7 Stima del costo dello stampo

Le attrezzature necessarie per la pressofusione risultano essere molto costose. Questo perchè il grande salto termico a cui è sottoposto lo stampo rende necessario l'utilizzo di ottimi acciai, aumentandone il costo; perchè i pozzi di traboccamento e i canali di colata occupano notevole spazio nello stampo e infine perchè per piccole produzioni è necessario avere un'attrezzatura separata per la pulizia del getto.

3.7.1 Costo del set di stampi

Il costo di un set di stampi può essere rappresentato come:

$$C_d = 1250 + 0.56A_c h_p^{0.4} \quad [\$]; \quad (3.7.1)$$

dove:

A_c : area della cavità, [cm²];

h_p : spessore combinato delle piastre delle cavità e dell'anima, [cm].

3.7.2 Costo dello stampo di ritaglio

Per definire il costo di uno stampo di ritaglio, bisogna definire inizialmente la complessità del profilo esterno:

$$X_p = \frac{P^2}{LW} \quad ; \quad (3.7.2)$$

dove:

P : perimetro del pezzo considerato, [cm].

I punti base di produzione si ottengono come:

$$M_{t0} = 15 + 0.125X_p^{0.75}h \quad . \quad (3.7.3)$$

Il fattore di correzione si calcola invece come:

$$f_{1w} = 1 + 0.04(LW)^{0.7} \quad . \quad (3.7.4)$$

Tenendo conto che sono necessarie due ore equivalenti di produzione per acquistare e installare un puntone standard, si può calcolare una stima del tempo per il taglio:

$$M_t = f_{1w}M_{t0} + 2N_h \quad ; \quad (3.7.5)$$

CAPITOLO 3

dove:

M_t : tempo per costruire l'utensile, [h];

N_h : numero di fori da tagliare.

A seconda della complessità del pezzo e dell'eventuale presenza di fori passanti, si ha un aumento del costo dello stampo di ritaglio. Approssimativamente si hanno 40 ore aggiuntive per direzioni addizionali di taglio; 17 ore aggiuntive per per ogni aumento della complessità delle linee di partizionamento.

Capitolo 4

Design per Colate in Sabbia

4.1 Stima dei Costi

La determinazione dei costi della fusione in sabbia è una procedura molto complicata, visto l'elevato numero di variabili di processo. Un'accurata stima è impedita dall'elevato numero di attrezzature coinvolte e dalle varie combinazioni di passaggi tra un'apparecchiatura ed un'altra. La procedura di stima dei costi verrà suddivisa in tre categorie: costo del metallo, costo dell'apparecchiatura e costo di lavorazione.

4.2 Costo del metallo

Il reparto di fusione, in fonderia, rappresenta una sostanziale fetta del costo del getto finale, solitamente attorno al 30 ÷ 50% del costo totale del processo.

Per determinare il peso totale del getto ci si basa sostanzialmente sull'inviluppo del pezzo, ottenendo una precisione del 15% del valore reale. La relazione per getti in sabbia è:

$$W_p = \rho V_{fc} \left[1 + 1.9 \left(\frac{L + W}{D} \right)^{-0.701} \right] ; \quad (4.2.1)$$

dove:

ρ : densità, [kg/m³];

V_{fc} : volume del getto finito, [m³];

L, W, D : lunghezza, larghezza, profondità della parte, [mm].

Una volta stimato il peso, il costo del metallo è determinato. Il costo del metallo comprende il costo del metallo grezzo, il costo dell'energia per

CAPITOLO 4

scaldare il metallo alla temperatura di colata, e il costo della fornace e attrezzature ausiliarie.

I passi per determinare il costo del metallo sono quindi:
-costo dell'energia della fornace

$$C_{en} = \frac{E_{ct}M_{me}}{F_{ff}} \quad [$/kg]; \quad (4.2.2)$$

dove:

E_{ct} : costo dell'elettricità, [\$/KWh];

M_{me} : minima energia di fusione, [KWh/kg];

F_{ff} : efficienza della fornace.

Valori tipici sono: $E_{ct} = 0.035$, $F_{ff} = 80\%$; per i valori di M_{me} si può consultare la tabella:

Leghe generiche	Densità [kg/m ³]	M_{me} [KW h/kg]
Ferro duttile	7110	0.391
Ferro grigio	6920	0.390
Ferro malleabile	7280	0.395
Acciai al carbonio	7830	0.939
Acciai inossidabili	7750	0.405
Alluminio	2710	0.326
Magnesio	1800	0.332
Bronzo	8800	0.185
Leghe di Nichel	9250	0.341

Tabella 4.1: Dati di fornace per getti in sabbia.

-Per coprire l'investimento di capitale, vi sono poi i costi fissi calcolati come:

$$C_{fk} = \frac{F_{fc}}{\rho} \quad [$/kg]; \quad (4.2.3)$$

dove:

F_{fc} : costi fissi di fornace, [\$/m³].

-In fine vi è il costo di manodopera, stimabile in $C_{lk} = 0.02$ \$/kg.

A questo punto si possono sommare i vari termini ottenendo:

$$C_{ms} = C_{rm} + C_{en} + C_{fk} + C_{lk} \quad [$/kg]; \quad (4.2.4)$$

DESIGN PER COLATE IN SABBIA

dove:

C_{rm} : costo del materiale grezzo, [\$/kg], ricavabile dalla tabella seguente.

Leghe generiche	Resistenza a trazione [MN/m ²]	Modulo di elasticità [GN/m ²]	Fondibilità	Costo [\$/kg]	Costo dello scarto [\$/kg]
Ferro duttile	515	165	Eccellente	0.29	0.07
Ferro grigio	-	130	Eccellente	0.22	0.07
Ferro malleabile	310	180	Buona	0.35	0.07
Acciai al carbonio	345	175	Discreta	0.73	0.09
Acciai inossidabili	515	200	Discreta	2.53	0.40
Alluminio	95	70	Eccellente	1.87	0.50
Magnesio	95	45	Eccellente	4.00	1.00
Bronzo	345	115	Buona	1.65	0.55
Leghe di Nichel	600	195	Discreta	11.00	2.20

Tabella 4.2: Dati vari per leghe comuni usate per getti in sabbia.

Il costo del metallo in un getto finito è più alto di quello che si potrebbe calcolare con la precedente formula, perché bisogna tenere conto anche del metallo del sistema di riempimento e del materiale di scarto. Con le correzioni da farsi, il costo del metallo in un getto finito è:

$$C_{mf} = \frac{C_{ms}W_p - C_{cv}(W_p - \rho V_{fc})}{1 - \frac{S_g}{100}} \quad ; \quad (4.2.5)$$

dove:

C_{ms} : costo del metallo “of the spout”, [\$/kg];

W_p : peso del metallo da colare, [kg];

ρ : densità del metallo, [kg/m³];

V_{fc} : volume del getto finito, [m³];

C_{cv} : prezzo del metallo, [\$/kg];

S_g : percentuale di scarto.

Se nella stima del costo il prezzo del metallo è ignoto, viene usato C_{rm} al posto di C_{ms} .

4.3 Costo della sabbia

Il costo di un nuovo stampo in sabbia si aggira attorno ai 13-35 \$/ton e dipende dalla finezza dei grani della stessa. Questo costo non include il costo di trasporto, il quale è il maggior responsabile della variazione dei prezzi.

CAPITOLO 4

Dopo l'uso la sabbia viene fatta raffreddare, vengono rimosse tutte le impurità e viene rigenerata per essere di nuovo utilizzata in aggiunta a sabbia nuova. Il costo della sabbia sul costo totale di produzione è molto basso, si aggira intorno al 3% del totale. Da un'analisi di vari getti si può approssimare il costo della sabbia intorno ai 0.018 \$/kg di metallo colato. Quindi il costo della sabbia per singolo pezzo è dato da:

$$C_{msd} = 0.018W_p \quad [$/kg]. \quad (4.3.1)$$

La sabbia dedicata alle anime è da considerarsi più costosa di quella per lo stampo. Ciò è dovuto al fatto che le anime devono essere più resistenti e quindi necessitano di una sabbia migliore; come per il caso precedente, si può stimare il prezzo in 0.084 \$/Kg.

Le anime si rovinano di frequente durante il processo, e la quota di scarto varia dal 4 al 40%; nella maggior parte dei casi lo scarto risulta essere pari all' 8%. Il costo per produrre un'anima in sabbia è quindi calcolabile con:

$$C_{csd} = \frac{\rho_{cs}V_cC_{cs}}{1 - \frac{S_c}{100}} \quad ; \quad (4.3.2)$$

dove:

ρ_{cs} : densità dell'anima, [kg/m³];

V_c : volume dell'anima, [m³];

S_c : percentuale di scarto;

C_{cs} : costo della sabbia, [\$/kg].

4.4 Costo dell'equipaggiamento

Per poter costruire un modello è necessario conoscere dove viene posizionato nello stampo, ciò determina le forme che devono essere montate nella staffa e le distanze tra gli stampi in colate con più cavità. Il progettista deve anche ricordarsi della presenza del sistema di riempimento. Uno spazio aggiuntivo deve essere previsto per l'inserimento delle materozze, dove necessario.

Il costo per il posizionamento dei piatti o per la formatura delle anime può variare da 1.3 a 4.4 \$/kg e dipende principalmente dalla quantità voluta. Per il modello di costo considerato, si assume che le piastre siano prodotte in grande quantità considerando un costo di 2 \$/kg. Il costo di lavorazione meccanica e attrezzatura per il semplice montaggio di un piatto risulta essere, per un modello medio, 0.025 \$/cm². Con questi valori, i costi tipici per accoppiare o montare le piastre si possono rappresentare come:

$$C_{pm} = 0.58A_{sl} \quad ; \quad (4.4.1)$$

DESIGN PER COLATE IN SABBIA

dove:

A_{pl} : area della piastra, [cm²].

Il passo successivo è quello di calcolare il costo di stampaggio del modello. Questo è dato valutando la complessità della superficie esterna del getto, basata sul numero di “patches” di superfici. Il patch di superficie è definito da segmenti piani, costanti o con leggeri cambi di curvatura. L’intersezione di due patches di superficie da luogo ad un cambio rapido di pendenza o curvatura. Nel conteggio delle patch di superficie che formano l’intero stampo vengono ignorate quelle dell’anima.

Usando l’indice di patches si può determinare quindi la riduzione di costo per la produzione di più stampi identici:

$$C_{pi} = R_t (0.313N_{sp}^{1.27} + 0.085A_p^{1.2}) N_{pi}^{0.7} ; \quad (4.4.2)$$

dove:

R_t : quota di produzione, [\$/h];

N_{sp} : numero di superfici di patches;

A_p : area riservata all’impronta, [cm²];

N_{pi} : numero di impronte uguali.

Il costo per il modello del sistema di riempimento dipende da molteplici fattori, come tipo di metallo o numero di cavità da riempire. Utilizzando un valore medio del 25% per l’incidenza del costo del sistema di alimentazione sul costo totale, si può ottenere il costo totale dall’equazione:

$$C_{pt} = G_f (C_{pm} + C_{pi}) ; \quad (4.4.3)$$

dove:

G_f : fattore di influenza, 1 per processo manuale e 1.5 per una linea automatica.

Per calcolare il costo totale della cassa d’anima si può utilizzare la relazione:

$$C_{box} = C_{pi} + C_{pm} ; \quad (4.4.4)$$

La stima dei costi di lavorazione si esegue moltiplicando le due equazioni precedenti per un appropriato fattore di costo R_{tf} riportato nella tabella seguente. La stessa tabella riporta anche informazioni sul numero di cicli che si possono effettuare con la stessa cassa d’anima prima di doverla sostituire.

CAPITOLO 4

Materiale del modello	Fattore di costo relativo, R_{tf}	Vita della cassa d'anima
Legno	0.25	2500
Plastica	0.40	5000
Ghisa	1.00	150000
Acciaio inossidabile	1.18	180000

Tabella 4.3: Durata di utilizzo e costi per vari materiali.

4.5 Costi di lavorazione

I costi di lavorazione si suddividono in tre categorie principali : costo della produzione delle anime, costo di produzione degli stampi di colata del metallo e costo di pulizia del getto.

Dato il numero elevato di variabili che può influenzare il costo di realizzazione delle anime, solitamente si ricorre alla relazione:

$$C_{core} = \frac{\rho_{cs} V_c R_{cm}}{P_{cm} \left(1 - \frac{S_c}{100}\right) \frac{P_{ff}}{100}} ; \quad (4.5.1)$$

dove:

ρ_{cs} : densità della sabbia dell'anima, [kg/m³];

V_c : volume dell'anima, [m³];

P_{ff} : efficienza dell'impianto, [%x100];

R_{cm} : quota operatore per produrre l'anima, [\$/h];

P_{cm} : rapporto di produzione delle anime, [kg/h];

valori tipici risultano essere:

$$P_{ff} = 85\%;$$

$$R_{cm} = 50 \text{ $/h};$$

$$P_{cm} = 53 \text{ kg/operatore} - h.$$

Per il costo della linea di lavorazione per stampo si ha:

$$C_{mp} = \frac{N_{mw} R_{mp}}{N_c P_{mp} \left(1 - \frac{S_m}{100}\right) \frac{P_{ff}}{100}} ; \quad (4.5.2)$$

dove:

N_{mw} : numero di lavoratori della linea;

R_{mp} : quota di lavoratori della linea di lavorazione dello stampo, [\$/h];

DESIGN PER COLATE IN SABBIA

N_c : numero di cavità dello stampo;
 P_{mp} : quota della linea di produzione degli stampi, [stampi/h];
 S_m : percentuale di scarto;
 P_{ff} : efficienza d'impianto.

Tipicamente si ha: $N_{mw} = 21$, $R_{mp} = 208$, $P_{mp} = 285$, $S_m = 2\%$.

In fonderia l'operazione che comporta la maggior manodopera, e quindi un costo elevato, risulta essere la pulizia del getto. Nella pulizia sono comprese le operazioni di sbavatura, rimozione del sistema di colata ed eliminazione della sabbia. La rimozione della sabbia risulta essere solitamente l'operazione più dispendiosa, influenzata in maggior parte dalla complessità di forma del getto.

Per un processo automatico di fusione di pezzi di medie dimensioni, si ha la seguente relazione per quanto riguarda il tempo della lavorazione di pulizia:

$$T_{cl} = 88.4W_p^{0.44} \quad [s/getto]. \quad (4.5.3)$$

Il costo di pulizia è quindi dato da:

$$C_{cl} = \frac{R_{cl}T_{cl}}{3600} \quad ; \quad (4.5.4)$$

dove:

T_{cl} : tempo totale di pulizia, [s];
 R_{cl} : quota di operazione per la pulizia, [\$/h].

La stanza dove si effettua la pulizia aggrava sulla quota di lavoro approssimativamente di 25 \$/h per piccole fonderie; tale valore va raddoppiato per impianti di grandi dimensioni.

4.6 Ruolo del design per la fonderia in sabbia

Nella fase di progettazione per un getto di fonderia le linee guida da tener in considerazione risultano essere:

- evitare angoli acuti e unioni di sezioni multiple;
- progettare sezioni di spessore costante;
- diminuire lo spessore delle pareti interne;
- stimare il ritiro del metallo;
- utilizzare linee di divisione semplici;
- definire un appropriato sovrametallo;
- usare tolleranze economiche.

CAPITOLO 4

Capitolo 5

Microfusione

5.1 Costo del materiale per il modello e per le anime

Ci sono differenti tipi di cere per i modelli e materiali per le anime. Di seguito ne riportiamo costi e caratteristiche.

Materiale del modello	Densità [g/cm ³]	Diffusività termica [mm ² /s]	Temperatura di iniezione [°C]	Temperatura di espulsione [°C]	Temperatura stampo [°C]	Pressione di iniezione [MN/m ²]	Costo [\$/kg]
Polistirene	1.59	0.90	218	77	27	96.5	1.12
Cera 1: liquida	0.99	0.92	65	50	25	1.4-3.4	3.09
Cera 2 :liquida	0.97	0.92	67	50	25	1.4-3.4	2.87
In pasta	0.97	0.92	60	48	25	1.4-3.4	2.87
Solida	0.97	0.92	49	50	25	2.7 min	2.87
Cera 3: liquida	1.00	0.92	68	50	25	1.4-3.4	3.17
Cera 4: liquida	1.13	0.92	64	50	25	1.4-3.4	2.45
In pasta	1.13	0.92	58	50	25	1.4-3.4	2.45
Solida	1.13	0.92	51	50	25	2.7 min	2.45
Cera 5: liquida	1.00	0.92	64	50	25	1.4-3.4	4.74

Tabella 5.1: Modello cere, materiali e proprietà.

CAPITOLO 5

Materiale del modello	Densità [g/cm ³]	Diffusività termica [mm ² /s]	Temperatura di iniezione [°C]	Temperatura di espulsione [°C]	Temperatura stampo [°C]	Pressione di iniezione [MN/m ²]	Costo [\$/kg]
Solubile: liquida	1.00	0.902	67	50	25	1.4-3.4	3.66
Solida	1.00	0.092	52	51	25	2.7 min	3.66
Ceramica silice	1.60	0.110	232	52	27	140	1.00

Tabella 5.2: Proprietà del materiale della anime.

Il costo del materiale per i modelli o le anime si può esprimere con la seguente equazione:

$$C_{pm} = D_{pm} M_{cp} V \frac{1 + S_a}{1000} \quad [\$]; \quad (5.1.1)$$

dove:

D_{pm} : densità dello stampo o anima, [g/cm³];

M_{cp} : costo dei materiali, [\$/kg];

V : volume dello stampo, [cm³];

S_a : ritiro del materiale del getto.

Il ritiro del materiale del getto è riportato in tabella seguente:

Metallo o lega	Ritiro %	Metallo o lega	Ritiro %
leghe di alluminio	3	magnesio bronzo	6
alluminio bronzo	6	rame nichel	6
ottone giallo	4	nichel	6
ghisa grigia	3	bronzo fosforo	4
ghisa bianca	6	acciaio al carbonio	5
stagno bronzo	5	acciaio al cromo	6
lead	8	acciaio al magnesio	8
magnesio	6	stagno	6
leghe al magnesio (25%)	5	zinco	8

Tabella 5.3: Ritiro dei metalli.

5.2 Costo di iniezione del modello in cera

Determino la grandezza della macchina con la seguente formula :

$$F = AP \quad ; \quad (5.2.1)$$

dove:

$$A = n_{pd} A_p (1 + P_{rv}) \quad ; \quad (5.2.2)$$

dove:

n_{pd} : numero di modelli (cavit ) per stampo;

A_p : area per una parte, [cm²];

P_{rv} : proporzione del canale di colata rispetto allo stampo;

e le pressioni di iniezione sono riportate nelle tabelle precedenti.

5.2.1 Tempo di riempimento

Si calcola nel seguente modo:

$$t_f = \frac{V_s}{Q_{max}} \quad ; \quad (5.2.3)$$

dove:

V_s : volume di iniezione richiesto, [cm³];

Q_{max} : massimo flusso di iniezione, [cm³/s].

5.2.2 Tempo di raffreddamento

Si differenzia a seconda che l'elemento sia a pareti sottili:

$$t_c = \frac{h_{max}^2}{9.87\alpha} \ln \frac{1.273(T_i - T_m)}{T_x - T_m} \quad ; \quad (5.2.4)$$

a pareti spesse:

$$t_c = \frac{l_s^2 w_s^2}{9.87(l_s^2 w_s^2)\alpha} \ln \frac{1.62(T_i - T_m)}{T_x - T_m} \quad ; \quad (5.2.5)$$

oppure a sezione cilindrica con L/D_i1:

$$t_c = d \frac{h_{max}^2}{23.1\alpha} \ln \frac{1.6(T_i - T_m)}{T_x - T_m} \quad ; \quad (5.2.6)$$

dove:

h_{max} : massimo spessore, [mm];

l_s : lunghezza della sezione, [mm];

w_s : larghezza della sezione, [mm];

d_{max} : massimo diametro della sezione, [mm];

α : diffusivit  termica, [mm²/s];

t_i : temperatura di iniezione, [ C];

t_m : temperatura dello stampo consigliata, [ C];

t_x : temperatura raccomandata di espulsione modello, [ C].

CAPITOLO 5

5.2.3 Tempo di espulsione e risistemazione

Tempo di apertura e chiusura della macchina, t_{oc} (s) per un'iniezione semi-automatica, si può stimare come :

$$t_{oc} = (c_f h_d + c_h) \left(\frac{1}{v_c} + \frac{1}{v_0} \right) + 1 \quad ; \quad (5.2.7)$$

dove:

- c_f : fattore di gioco dello modello;
- h_d : profondità dello modello, [cm];
- c_h : gioco manuale, [cm];
- v_c : velocità di chiusura della pressa, [cm/s];
- v_0 : velocità di apertura della pressa, [cm/s].

Il tempo totale di risistemazione t_r (s), per un'iniezione semiautomatica dello stampo è determinato da:

$$t_r = t_{oc} + 0.4 + (3n_c + 2)n_{pd} \quad ; \quad (5.2.8)$$

dove:

- n_c : numero di anime per modello inserite nello stampo;
- n_{pd} : numero di stampi o cavità per stampo.

Per stampi manuali, il tempo di apertura e chiusura sarà:

$$t_{oc} = 0.5 \left(\frac{1}{v_c} + \frac{1}{v_0} \right) + 1 \quad . \quad (5.2.9)$$

Il tempo totale di risistemazione t_r [s], per un'iniezione manuale dello stampo è determinato da:

$$t_r = t_{oc} + 15.8 + 3n_c + 4n_{sp} + 6n_l + 10n_{ud} \quad ; \quad (5.2.10)$$

dove:

- n_{sp} : numero di espulsori per modello;
- n_l : numero di leve per modello;
- n_{ud} : numero di accessori di svitamento per modello.

5.3 Costo del processo per anime e modelli

Calcolo il tempo totale di ciclo:

$$t_t = t_f + t_c + t_r \quad ; \quad (5.3.1)$$

dove:

t_f : tempo di iniezione;

t_c : tempo di raffreddamento;

t_r : tempo di reset.

In fine il costo totale del processo di creazione del modello e anima, C_{ip} [\$], è il costo del ciclo diviso il numero di modelli per stampo:

$$C_{ip} = \frac{M_i t_t}{3600 n_{pd}} \quad ; \quad (5.3.2)$$

dove:

M_i : quota di macchina e operatore, [\$/ora], ricavata dalla tabella sottostante:

Forza di serraggio [KN]	Costo della macchina [\$]	Quota combinata macchina-operatore [\$/h]
107	31000	30
311	43000	31
445	51000	33
890	83000	38
1334	143000	47
2670	220000	58

Tabella 5.4: Quote macchina per iniezione cera.

5.3.1 Valutazione del costo di iniezione delle anime

Il costo per iniettare la cera solubile delle anime è lo stesso per i modelli.

5.3.2 Costo degli stampi per il modello e le anime

Il costo di uno stampo grezzo C_b [\$] si calcola con la seguente equazione:

$$C_b = C_{vp} + C_{fp} \quad ; \quad (5.3.3)$$

dove:

C_{vp} : costo dei piatti contenenti le anime e le cavità e si ricava da:

$$C_{vp} = 0.0215 h_p A_c + 0.428 A_c n_{pi} + 14.27 h_p + 32.18 n_{pi} \quad ; \quad (5.3.4)$$

Con C_{fp} [\$] è il costo degli espulsori, delle materozze, dei piatti estrattori; lo spessore non dipende dalla profondità del modello.

$$C_{fp} = 0.66 A_c + 366 \quad ; \quad (5.3.5)$$

CAPITOLO 5

dove:

A_c : area proiettata dello stampo grezzo, [cm²];

n_{pt} : numero di anime e di cavità nello stampo;

h_p : spessore combinato delle anime e delle cavità, C_m calcolato nel seguente modo:

$$h_p + h_d + n_{cl} + h_{cl} \quad ; \quad (5.3.6)$$

dove:

h_d : profondità del pezzo, [cm];

n_{cl} : numero di giochi richiesti;

h_{cl} : gioco minimo, [cm].

Per stampi manuali servono solo piastre diverse e C_{fp} è nullo.

Normalmente il numero di giochi necessari sono 2, e il minimo gioco è 2.5 cm per stampi manuali e 7.5 per stampi semiautomatici ad iniezione di cera.

Lo spessore totale o la profondità dello stampo grezzo, h_{pt} [cm], è uguale alla somma di tutti gli spessori combinati delle piastre dello stampo grezzo:

$$h_{pt} = h_p + h_{fp} \quad ; \quad (5.3.7)$$

dove:

h_{fp} : spessore degli estrattori, materozza e le piastre di espulsione, [cm].

Questo spessore arriva ai 10 cm per formature semiautomatiche.

Il costo dello stampo base C_{ab} [\$], si trova:

$$C_{ab} = 1.1C_b \quad . \quad (5.3.8)$$

Il costo della formatura dello stampo grezzo rispetto a quello finito dipende dal tempo che serve per fare eseguire le operazioni necessarie. La seguente equazione calcola le ore di lavorazione necessarie per creare la sagoma:

$$M_x = 0.1n_s \quad ; \quad (5.3.9)$$

dove:

n_s : numero di componenti del pezzo.

Per uno stampo in alluminio la preparazione dei fori per l'espulsione è facile da eseguire. Il tempo, M_e per preparare questi fori è:

$$M_e = 0.5A_{ip}^{0.5} \quad ; \quad (5.3.10)$$

con:

$$A_{ip} = A_p n_{pd} \quad ; \quad (5.3.11)$$

dove:

A_p : area di una parte;

n_{pd} : numero di parti.

Il fattore di correzione 0.5 si utilizza per l'iniezione semiautomatica di cera.

Il tempo per costruire una superficie dello stampo non liscia in alluminio è:

$$M_s = 0.2 f_p A_{ip}^{0.5} \quad ; \quad (5.3.12)$$

dove:

f_p : fattore di correzione della superficie.

Il tempo totale di costruzione dello stampo, M_{tot} si ottiene sommando tutti i contributi individuali, il costo della costruzione dello stampo, C_{dm} [\$], è così determinato:

$$C_{dm} = R_{ds} M_{tot} \quad ; \quad (5.3.13)$$

dove:

R_{ds} : quota di costruzione stampo, [\$/ora].

Il costo finale dello stampo:

$$C_d = C_{dm} + C_{ab} + C_{ac} \quad ; \quad (5.3.14)$$

dove:

C_{dm} : costo di lavorazione stampo;

C_{ab} : costo dello stampo grezzo;

C_{ac} : costo dei componenti standard di movimentazione (espulsori).

5.4 Costo del modello e di assemblamento del grappolo

Il costo di assemblamento dello stampo si calcola con:

$$C_{tpa} = \frac{W_{pa} t_{pa}}{3600} + \frac{W_{pa} S_{pa}}{B_s} + \frac{C_{af}}{P_v} \quad ; \quad (5.4.1)$$

CAPITOLO 5

dove:

W_{pa} : quota operatore per modello, [\$/h];

S_{pa} : tempo di preparazione per l'assemblaggio, [h];

B_s : numero di parti;

C_{af} : costo dell'apparecchiatura per l'assemblaggio;

P_v : numero di produzione totale.

E dove il tempo necessario per l'assemblamento, t_{pa} [s], è:

$$t_{pa} = 20(n_{pa} - 1) + 5 \quad ; \quad (5.4.2)$$

Con n_{pa} : numero dei pezzi dello stampo da assemblare.

Una volta che il modello è stato completato, è tutto pronto per unire il sistema di colata, questo comprende l'ingresso che non fa già parte del modello, poi si uniscono i canali di colata. I componenti del sistema di colata di solito sono fatti da cera riciclata e non si contano sul costo del materiale grezzo.

Le operazioni di assemblaggio comprendono la cera per incollare tutti gli stampi al sistema di alimentazione. Il tempo per preparare la stazione di montaggio per ogni nuovo tipo di parte è stimato in 7 minuti. Con queste assunzioni il costo totale per l'assemblaggio del grappolo, C_{ta} [\$], è:

$$C_{ta} = \frac{W_{pa}t_{ca}}{3600} + 1.5 + W_{pa}S_{ca} \quad ; \quad (5.4.3)$$

dove:

S_{ca} : tempo richiesto per impostare l'assemblaggio del grappolo, [h];

t_{ca} : è il tempo per l'assemblaggio del grappolo [s], e si calcola come:

$$t_{ca} = 10(n_{pc}+3) \quad ; \quad (5.4.4)$$

con n_{pc} : numero di parti per grappolo.

5.4.1 Numero di parti del grappolo

La maggior parte di modelli o parti si devono unire in un grappolo, con il minore costo per formare il grappolo. Il numero di parti per grappolo è limitato dal massimo peso (18kg) e grandezza che può essere maneggiato.

Per la stima del numero di parti per grappolo, è necessario avere a disposizione due valori:

- 1 il rendimento del getto, Y_d , che è il rapporto tra il peso del getto finale del grappolo e il peso del metallo versato ;
- 2 il rendimento del guscio dello stampo, definito come il rapporto del peso del getto finale del grappolo per il peso del guscio dello stampo secco.

Sulla base di dati industriali si sono ricavate le seguenti formule empiriche:

$$Y_d = 0.0482 \ln(W) + 0.455 \quad ; \quad (5.4.5)$$

$$Y_{sm} = 0.148 \ln(W) + 0.843 \quad ; \quad (5.4.6)$$

dove:

W : peso della parte, [kg].

Il numero di parti per grappolo, n_{pc} , si trova da:

$$n_{pc} = \frac{16}{\frac{E}{Y_d} + \frac{W}{Y_s}} \quad . \quad (5.4.7)$$

5.4.2 Costo per singolo modello

Il costo totale per un solo modello, C_{tp} [\$], è la somma del costo di iniezione, del materiale del modello, della preparazione, del costo dello stampo ammortizzato sulla produzione totale.

$$C_{tp} = \frac{C_{ip} + C_{pm}}{1 - P_{psr}} + \frac{M_i S_{ds}}{B_s} + \frac{C_d}{P_v} \quad ; \quad (5.4.8)$$

dove:

C_{ip} : costo di lavorazione per singolo modello;

C_{pm} : costo della cera per singolo modello;

P_{psr} : quota di scarto per singolo modello;

M_i : quota operatore e macchina di iniezione;

S_{ds} : tempo di preparazione dello stampo nella macchina di iniezione;

B_s : grandezza del gruppo;

C_d : costo dello stampo per il singolo modello;

P_v : produzione totale.

5.5 Pulizia e preparazione della superficie

Per la stima di questo si assume che il costo della pulizia e della preparazione della superficie, e dell'attrezzatura sia molto piccolo. Il tempo per il carico e lo scarico sia di 8 secondi ad un costo di 23 \$/ora.

5.6 Costo del materiale del guscio

Per una proposta di stima del costo, vengono considerati tre bagni di zirconio seguiti da quattro di silice e uno di silice fusa, tutti applicati manualmente. Il peso del guscio secco, W_{sm} [kg], è dato da:

$$W_{sm} = \frac{n_{pc}W}{Y_{sm}} \quad ; \quad (5.6.1)$$

dove:

n_{pc} : numero di parti per grappolo;

W : peso della singola parte, [kg].

Per una stima veloce si assume che il costo del materiale del guscio sia di 1 \$/Kg.

5.6.1 Rivestimento del grappolo

Il costo per il rivestimento primer del grappolo si trova con:

$$C_{pr} = \frac{M_{pr}(t_{c1} + (n_{cp} + 1)t_{cp})}{3600} \quad ; \quad (5.6.2)$$

dove:

M_{pr} : quota di macchina e operatore, [\$/];

t_{c1} : tempo per l'applicazione del rivestimento primer;

t_{cp} : tempo per applicare ciascuno dei seguenti rivestimenti;

n_{cp} : numero di rivestimenti primer.

L'applicazione del primo rivestimento è dato con molta cura e si stima un tempo di 20s. Comprensivo del tempo per rimuovere il grappolo dalla rastrelliera, immergerlo nel bagno, muoverlo per una copertura uniforme, immergerlo nel bagno refrattario e porlo nella griglia di asciugatura. I successivi due rivestimenti ceramici e refrattari si stimano in 25 secondi per ogni rivestimento. Le applicazioni del rivestimento di sostegno vengono eseguite con delle macchine e si possono calcolare come:

$$C_{bu} = \frac{n_{cb}M_{bu}t_{cb}}{3600} \quad ; \quad (5.6.3)$$

dove:

n_{cb} : numero di rivestimenti di sostegno;

M_{bu} : quota di macchina e operatore .per i rivestimenti di sostegno, [\$/h];

t_{cb} : tempo per applicare il rivestimento di sostegno, [s].

si assume un valore di 35.5 \$ per ora per il macchinario, 10 s per applicazione di ogni rivestimento di sostegno, e un costo di 0.10 \$.

5.6.2 Espulsione della cera

Il costo per liquefare e espellere la cera, comprende il costo della manodopera per mettere e togliere il grappolo dall'autoclave o forno, il costo dell'utilizzo dell'unità di espulsione e l'energia consumata.. Il tempo di carico scarico è stimato in 8s, che con un costo orario di manodopera di 23\$ si raggiunge un costo per grappolo di 0.05 \$.

Il costo di una macchina per l'espulsione della cera si aggira attorno ai 10000\$, per una macchina che ha la capacità di 10 grappoli con un costo di 1.52 \$/ora, assumendo un utilizzo continuo, una svalutazione di dieci anni, e il 10% di interessi d'acquisto. Il costo per grappolo per 15 minuti di ciclo è di 0.04 \$. Il costo dell'energia consumata per grappolo si stima in 0.06 \$.

5.6.3 Sinterizzazione

La quota della fornace di sinterizzazione è comparabile a quella del forno per il deceramento.

5.6.4 Costo totale del guscio

È la somma dei costi seguenti:

assemblamento del grappolo, pulitura e finitura del modello del grappolo, applicazioni di 3 rivestimenti primari, applicazione di 5 rivestimenti di supporto, deceramento, sinterizzazione, materiale del guscio.

5.6.5 Costo di fusione del metallo

Il costo per la fusione della lega o del metallo tiene conto di tre fattori: energia, attrezzatura e manodopera.

Si può calcolare il costo per kg come:

$$C_e = \frac{C_p E_m}{n_e} \quad ; \quad (5.6.4)$$

dove:

C_p : costo dell'elettricità, [\$/KWh];

CAPITOLO 5

E_m : minima energia richiesta per sciogliere il metallo, [KWh/kg];
 n_e : efficienza del forno ad induzione.

I valori di efficienza per alcuni tipi di materiale sono riportati in tabella:

Gruppi di materiale	Approssimata efficienza del forno
ferrosi	0.80
alluminio	0.60
nonferrosi	0.70

Tabella 5.5: Efficienza approssimata.

La minima energia richiesta per alcuni tipi di materiale è stata riportata in tabella:

Metallo	Temperatura del forno	Energia richiesta
bronzo alluminio	1200	0.237
lega di alluminio	750	0.237
alluminio puro	750	0.326
ottone (58% rame)	1030	0.173
ottone (63% rame)	1030	0.177
ottone (73% rame)	1080	0.183
ottone (85% rame)	1120	0.170
ottone (90% rame)	1140	0.194
bronzo	1100	0.185
rame puro	1200	0.204
oro puro	1150	0.066
ghisa grigia	1500	0.390
ferro puro	1600	0.391
lead puro	450	0.023
magnesio puro	700	0.332
ghisa nera	1550	0.395
ghisa grigia	1550	0.405
Cu 70%-Mn 30%	1030	0.193
nicel puro	1600	0.341
argento puro	1050	0.107
ghisa sferoidale	1550	0.400
acciaio	1600	0.393
acciaio inossidabile	1650	0.405
zinco puro	500	0.093
stagno puro	400	0.037

Tabella 5.6: Minima energia richiesta per la fusione.

MICROFUSIONE

Il costo macchina per una lega particolare, C_{mf} [\$/kg], si calcola moltiplicando il costo per kg di ferro per il rapporto tra le densità del ferro e della lega desiderata:

$$C_{mf} = C_{mi} \frac{\rho_i}{\rho_a} \quad ; \quad (5.6.5)$$

dove:

C_{mi} : costo del forno per chilogrammo di ferro;

ρ_i : densità del ferro;

ρ_a : densità della lega.

Nella tabella seguente troviamo il costo di lavorazione per il ferro, questi dati possono andare bene anche per altri tipi di lega, per un forno tipico per microfusione di 250 Kg, il costo per chilogrammo di lavoro è stimato in 0.048 \$/kg.

Grandezza forno	Costi di acquisto e installazione del forno [\$]	Quota di macchina compreso il ricarica [\$/h]	Tempo di ciclo [h]	Costo di macchina per ciclo [\$/h]	Costo di macchina per kg di ferro [\$]
2000	250000	38	1.6	61	0.031
1000	200000	30	1.4	51	0.041
500	150000	23	1.2	28	0.056
250	100000	15	1.2	18	0.072
150	64000	10	1.1	11	0.073

Tabella 5.7: Quote macchina per forni ad induzione.

Grandezza forno	Costo del lavoro per ciclo [\$]	Costo del lavoro per kg di ferro [\$]
2000	34	0.017
1000	21	0.021
500	15	0.030
250	12	0.048
150	11	0.070

Tabella 5.8: Quote di lavoro per forni ad induzione.

5.7 Costo del metallo liquido pronto da colare

Il costo del metallo liquido già pronto per essere colato, si trova sommando tutti i costi di fusione e del metallo grezzo. Il costo del metallo liquido, C_m [\$/kg], è la somma del costo dell'energia, del costo macchina e il costo del materiale grezzo:

$$C_m = C_e + C_{mf} + C_{ml} + C_{rm} \quad ; \quad (5.7.1)$$

dove:

C_e : costo dell'energia per kg di metallo fuso, [\$/kg];

C_{mf} : costo della fornace per kg di lega, [\$/kg];

C_{ml} : costo della manodopera per kg di lega, [\$/kg];

C_{rm} : costo del metallo grezzo, [\$/kg].

5.8 Costo di colata

Per stimare il costo di colata si considera che siano necessari quattro operai che possano colare 1500 kg/ora.

Adoperando un valore medio del costo della manodopera di 27 \$/ora, si calcola il costo di colata per chilogrammo come:

$$C_{mp} = 0.072 \quad [$/h]. \quad (5.8.1)$$

5.9 Costo finale del materiale

Il costo finale del materiale colato è il costo totale del materiale senza lo scarto recuperato dopo la rimozione.

Il costo del materiale al kilogrammo, C_{mat} , in cui si è tenuto conto delle semplificazioni è:

$$C_{mat} = \frac{C_m + C_{mp} - V_{sc}(1 - P_1 + Y_d)}{Y_d} \quad ; \quad (5.9.1)$$

dove:

$$Y_d = \frac{n_{pc}W}{W_{pr}} \quad ; \quad (5.9.2)$$

dove:

C_m = costo del metallo liquido non versato, [\$/kg];

C_{mp} = costo di colata, [\$/kg];

V_{sc} = costo dello scarto, [\$/kg];
 P_l = proporzione del metallo perso;
 Y_d = rendimento del getto;
 n_{pc} = numero di parti per grappolo;
 W = peso della singola parte, [kg];
 W_{pr} = peso del materiale versato in un singolo getto, [kg].

5.10 Rottura del guscio

Il costo della rottura pneumatica comprende: il costo della sistemazione del grappolo nella macchina, e il costo della manodopera. il costo della macchina è abbastanza contenuto e si assume essere uguale a quello della manodopera. Il costo per grappolo, C_{bo} [\$], per una rottura pneumatica si calcola con la seguente equazione:

$$C_{bo} = C_{nh} + \frac{C_{ns}n_{pc}}{B_s} \quad ; \quad (5.10.1)$$

$$C_{nh} = \frac{t_{nh}R_{nh}}{3600} \quad ; \quad (5.10.2)$$

$$C_{ns} = S_{nh}R_{nh} \quad ; \quad (5.10.3)$$

dove:

C_{nh} : costo operatore per grappolo per ogni ciclo di rottura pneumatico, [\$];

C_{ns} : costo di adeguamento della macchina, [\$];

n_{pc} : numero di parti per grappolo;

B_s : numero di parti per gruppo di produzione;

t_{nh} : tempo macchina per rompere il guscio, [s];

R_{nh} : costo operatore per la rottura del guscio, [\$/h];

S_{nh} : tempo di preparazione del martello pneumatico, [h].

5.11 Pulizia

Il costo dei materiali necessari è piccolo, l'operaio non deve necessariamente essere presente durante il bagno, per questo il costo tiene conto solo del tempo per mettere e togliere il grappolo dal bagno. Tenendo conto del precedente valore di 10 s per caricare e scaricare il grappolo, il costo diventa:

$C_{ci} = 0,07$ \$ per grappolo

5.12 Taglio del grappolo

Il costo del ciclo di taglio comprende il costo di preparazione, il costo del materiale (utensili) e la manodopera. Il costo della macchina si assume che sia piccolo (per materiali relativamente teneri).

Può essere stimato:

$$C_{co} = C_{cf} + C_{tw} + \frac{C_{fs}n_{pc}}{B_s} \quad ; \quad (5.12.1)$$

$$C_{cf} = \frac{t_{co}R_{co}}{3600} \quad ; \quad (5.12.2)$$

$$C_{fs} = S_{co}R_{co} \quad ; \quad (5.12.3)$$

$$t_{co} = t_{ci} + (t_{cq} + t_{gp})n_{gp}n_{pc} + (t_{sc} + t_{so})n_{so} \quad ; \quad (5.12.4)$$

dove:

C_{co} : costo totale del taglio del grappolo, [\$];

C_{cf} : costo della manodopera per il taglio del grappolo, [\$];

C_{tw} : costo dell'utensile per il taglio, [\$];

C_{fs} : costo del settaggio della macchine per lo specifico grappolo, [\$];

n_{pc} : numero di parti per grappolo;

B_s : numero di parti per gruppo di produzione;

t_{co} : tempo del ciclo per tagliare tutto il grappolo, [s];

R_{co} : costo delle manodopera orario, [\$/h];

S_{co} : tempo per organizzare le operazioni di taglio, [h];

t_{cl} : tempo per caricare il grappolo, [s];

t_{gc} : tempo per tagliare il singolo canale di colata, [s];

t_{gp} : tempo per riposizionare il grappolo per tagliare il canale di colata successivo, [s];

n_{gp} : numero di canali di colata per grappolo;

t_{sc} : tempo per tagliare le materozze e i canali di colata supplementari, [s];

t_{so} : tempo per riposizionare il grappolo per il successivo taglio supplementare, [s];

n_{so} : numero di tagli supplementari per grappolo.

lo stesso costo della manodopera di 25 \$/h usato per la rottura del guscio si usa anche per il taglio del grappolo. Il tempo per il setup dell'operazione, S_{co} , è stimato in 5 minuti. Il tempo per caricare il grappolo, t_{cl} , è stimato in 4s. il tempo per tagliare completamente un singolo canale di colata si calcola con:

$$t_{cg} = \frac{w^2}{m_{rc}} \quad ; \quad (5.12.5)$$

MICROFUSIONE

dove:

m_{rc} : rapporto di taglio, [cm²/s];

w : spessore del canale di colata, [cm].

Un valore medio del rapporto di taglio è di 0.2 cm²/s.

Il numero di tagli supplementari è stato semplicemente stimato.

$$n_{so} = \int (-0.7W + 6.5) \quad \text{se } W > 7 \text{ e } n_{so} = 1 \quad ; \quad (5.12.6)$$

dove:

n_{so} : numero di tagli supplementari;

W : peso della parte, [kg].

CAPITOLO 5

Capitolo 6

Colata continua

6.1 Macchine di colata continua

L'utilizzo di un processo di colata continua risulta estremamente conveniente nel caso di produzione di semiprodotto poco diversi dimensionalmente tra loro e destinati, ad esempio, alla laminazione.

Il prodotto di colata, che si presenta sotto forma di solido a sezione rettangolare con superficie solidificata, viene fatto avanzare verso il basso da un sistema a rulli, e quindi tagliato in bramme della lunghezza voluta. Successivamente le bramme sono inviate ai forni di omogeneizzazione della temperatura e poi alla laminazione.

Andando ad analizzare in dettaglio un impianto convenzionale per la colata continua, riportato in figura 6.1, si ha che l'acciaio fuso viene versato dalla siviera di colata in un serbatoio d'accumulo detto panieriera, dal quale viene derivato un condotto di colata che alimenta una lingottiera di rame, raffreddata ad acqua, il cui compito è quello di assicurare una rapida solidificazione dello strato superficiale.

CAPITOLO 6

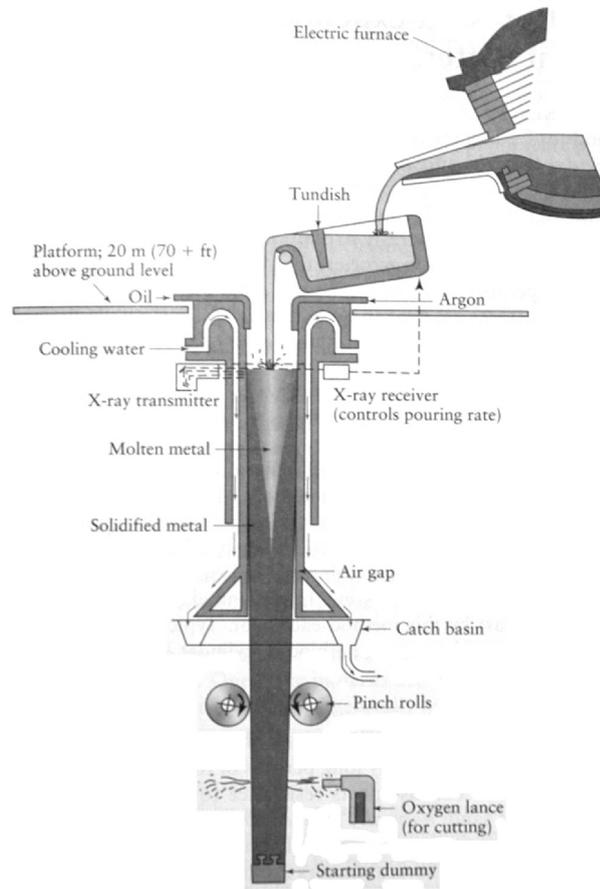


Figura 6.1: Schema dell'impianto di colata continua.

La paniera è l'ultimo recipiente in cui transita l'acciaio allo stato liquido. Dal punto di vista metallurgico, le sue funzioni sono quelle di migliorare la pulizia dell'acciaio e di controllare la temperatura di colaggio in relazione alla conseguente struttura di solidificazione.

Inoltre, ha il compito di distribuire l'acciaio liquido tra le diverse linee e di fungere da polmone durante i cambi siviera.

L'attuale sviluppo degli impianti di colata continua, sia per nuove realizzazioni che per ristrutturazione di quelli già esistenti (revamping), è orientato verso il massimo aumento della produttività possibile, sempre senza compromettere la qualità finale del prodotto.

Poiché la produttività è direttamente proporzionale all'area del semiprodotto e alla sua velocità di estrazione:

$$P = 2srLv \quad ; \quad (6.1.1)$$

COLATA CONTINUA

dove:

P : produttività [kg/min]

r : densità del materiale

L : larghezza del semiprodotto [mm]

s : semispessore del semiprodotto [mm]

v : velocità di estrazione [mm/min].

Si può cercare di aumentarla operando sia sulla sezione da colare sia sulla velocità di colaggio. Una tendenza più recente e innovativa, protesa all'aumento della produttività e soprattutto alla contemporanea riduzione dei costi di investimento e di esercizio, è di colare sezioni sempre più sottili del semilavorato grezzo avvicinandosi al prodotto finito, come bramme piatte, sottili o nastri colati.

Vantaggi e svantaggi:

- riduzione fasi del ciclo di lavorazione;
- meccanizzazione operazioni di colata;
- riduzione costi di esercizio;
- riduzione aree impianti;
- riduzione incidenza manodopera;
- considerazioni ecologiche;
- aumento resa acciaio liquido/semiprodotto (95-97%).

Schema di principio:

CAPITOLO 6

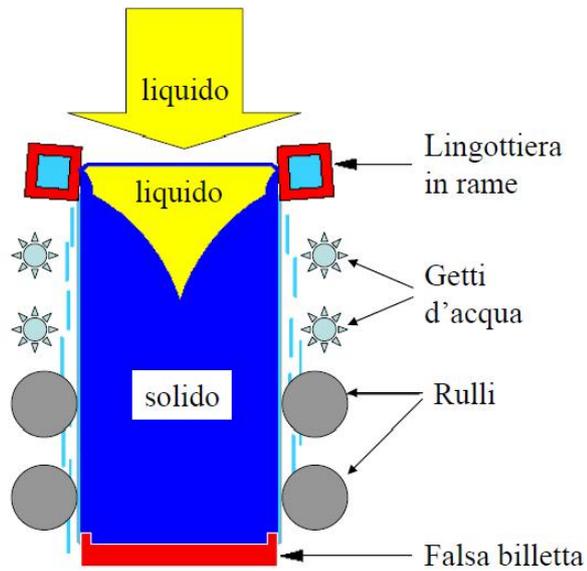


Figura 6.2: .

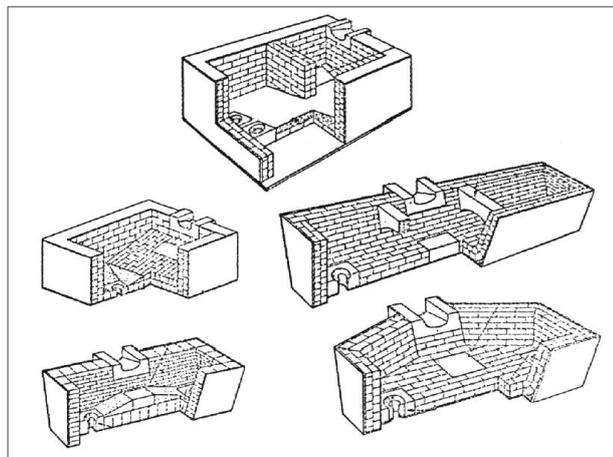


Figura 6.3: Tipologie di paniere.

Lingottiere: Costruite in rame e circondate dai circuiti di raffreddamento; di lunghezza massima compresa tra 600 e 900 mm.

Le macchine impiegate hanno diverse linee di colata continua: 1 o 2 se bramme, fino a 8 se billette.

I prodotti della colata continua sono:

COLATA CONTINUA

- BLUMO: sbozzato di sezione retta 16900 mm^2 ; il blumo propriamente detto ha sezione quadrata, di lato compreso tra 130 e 400 mm, con bordi arrotondati;
- BRAMMA: blumo a sezione rettangolare con altezza minore o uguale a $1/4$ della larghezza;
- BILLETTA: prodotto a sezione quadrata e bordi arrotondati di sezione fino a $150\text{-}200 \text{ cm}^2$.

6.2 Tipologie di colata continua

6.2.1 Colata continua verticale

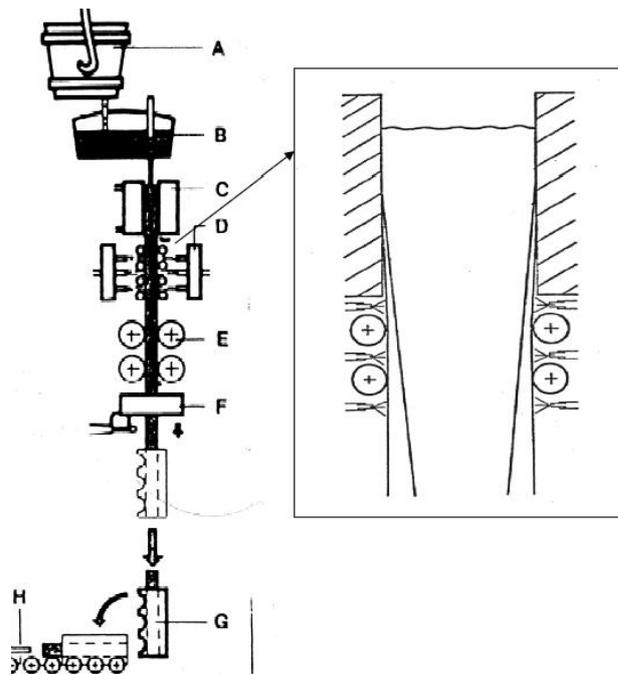


Figura 6.4: Tipologie di colata continua.

- A. Siviera
- B. Paniera (tundish)
- C. Lingottiera raffreddata ad acqua
- D. Iniettori ad acqua
- E. Rulli estrattori
- F. Stazione di taglio

CAPITOLO 6

G. Cestello ribaltatore

H. Sistema trasporto barre

I componenti principali sono:

- Paniera: ripartitore intermedio, per assicurare costanza del battente ferrostatico e quindi deflusso regolare in lingottiera
- Lingottiera in rame, senza fondo: limitato movimento oscillatorio verticale, velocità di salita v velocità di discesa (3:1), moto relativo tra lingottiera e barra, fino a 120 cicli di oscillazione al minuto acqua di raffreddamento: 8-10 m/s, 6-7 atm consumo di acqua: 7-8 litri per kg di acciaio colato
- Getti di acqua di raffreddamento: (raffreddare fino a circa 800°C)
- Rulli guida e rulli di trascinamento

6.2.2 Colata continua curva

E' preferibile alla colata continua verticale per i seguenti motivi:

	Verticale	Verticale con incurvamento	Curva
lunghezza della brama ottenibile	limitata da altezza macchina	non ci sono limitazioni	non ci sono limitazioni
velocità di estrazione	limitata da altezza macchina	limitata da altezza macchina	possibilità di aumentare la velocità
Ingombro	necessità di una torre o di un pozzo profondo (18-30 m)	necessità di spazio sia orizzontale sia verticale (15-22 m)	necessità di grande area e poco spazio in altezza (4-9 m)
Processo	operazioni relativamente semplice	operazioni complicata per curvare/raddrizzare	operazioni complicate per raddrizzare
Sezioni colatura	qualsiasi forma e dimensione	limitazione nello spessore della sezione colabile	limitazione nello spessore della sezione colabile
Acciai colabili	qualsiasi tipo di acciaio	difficoltà per acciai non deformabili alla T in gioco	difficoltà per acciai non deformabili alla T in gioco
Esercizio (cambio sez)	facilità del preparare la macchina nel cambio di sezione	facilità del preparare la macchina nel cambio di sezione	difficoltà del preparare la macchina nel cambio di sezione
Esercizio (incidente)	facilità di evacuazione della barra in caso di incidente	difficoltà di evacuazione della barra in caso di incidente	difficoltà di evacuazione della barra in caso di incidente
Pressione ferrostatica	la. ferr. è molto alta e per sostenerla servono sistemi costosi	la p. ferr. ostacola l'aumento della capacità produttiva	minor battente ferrostatico con maggiore facilità di portare p.ferr. al nucleo
Considerazioni produttive	produttività insufficiente perchè velocità di estrazione limitata	aumento della velocità di evacuazione e della produttività	aumento della velocità di evacuazione e della produttività

Tabella 6.1: Costo del processo espresso in unità fittizia w.

6.3 Parametri di processo

- Temperatura di preriscaldamento di distribuzione
- Temperatura dell'acciaio nella siviera e nel canale di distribuzione
- Frequenza di oscillazione lingottiera
- Portata e pressione acqua di raffreddamento primario
- Temperatura di entrata e uscita acqua di raffreddamento primario
- Portata e pressione raffreddamento secondario
- Velocità di estrazione
- Temperatura superficiale barra colata dopo raffreddamento secondario
- Pressione di serraggio rulli estrattori
- Assorbimento di potenza dei motori dei rulli estrattori
- Lunghezza delle barre colate

I parametri collegati sono:

- Temperatura acciaio
- Capacità siviera
- Velocità di estrazione
- Numero linee
- Portata acqua di raffreddamento in lingottiera
- Portata acqua raffreddamento secondario

Di seguito riportiamo la caduta di temperatura dell'acciaio nella siviera in funzione del tempo di permanenza e della capacità della siviera stessa.

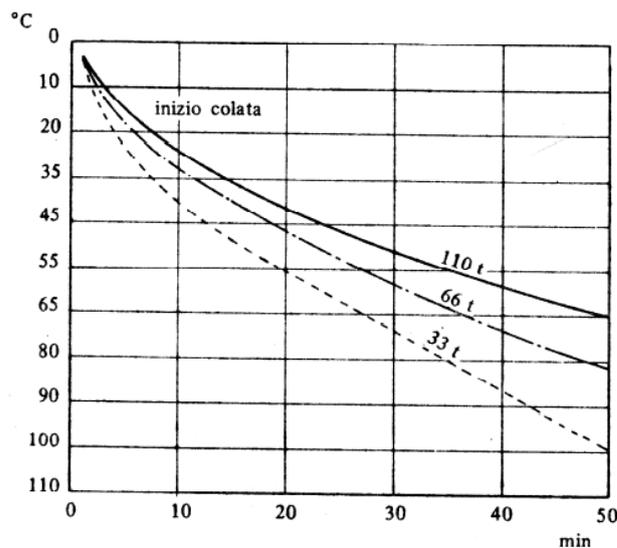


Figura 6.5: Caduta di temperatura dell'acciaio nella siviera.

6.4 Capacità produttiva

La capacità produttiva del processo dipende da:

- Caratteristiche tecnologiche
- Soluzioni impiantistiche ausiliarie
- Gestione e programmazione impianto
- Tipo di impianto di fabbricazione acciaio

La velocità di colaggio dipende dalla lunghezza del cuore liquido (L). Al momento del taglio la barra deve essere completamente solidificata

$$s = k\sqrt{t} \quad ; \quad (6.4.1)$$

dove:

s = spessore della pelle [mm];

t = tempo [min];

$k = 20-30$.

Mentre la lunghezza del cuore del liquido si ricava:

$$L = t \cdot v \quad ; \quad (6.4.2)$$

dove:

L = lunghezza cuore liquido [m];

v = velocità [m/min].

Lo spessore della pelle possiamo ricavarlo dal seguente grafico :

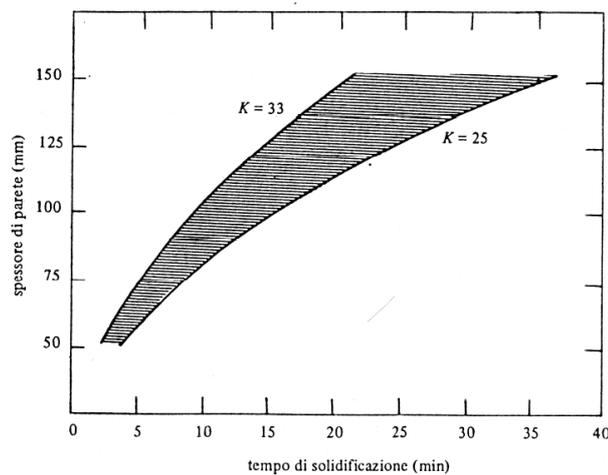


Figura 6.6: Spessore della pelle.

COLATA CONTINUA

Quantità di calore da sottrarre:

$$P \cdot [L + c_{acciaio} (T_i - T_s)] \quad ; \quad (6.4.3)$$

dove:

P = peso di metallo;

L = calore latente di fusione dell'acciaio;

$c_{acciaio}$ = calore specifico dell'acciaio liquido;

T_i = temperatura iniziale dell'acciaio liquido;

T_s = temperatura di solidificazione dell'acciaio;

$$S_{min} = f(\text{sezione del prodotto}) \quad ; \quad (6.4.4)$$

S dipende dal calore trasmesso in lingottiera.

Il raffreddamento secondario asporta maggior quantità di calore e serve per aumentare la velocità di colaggio (v).

Velocità equivalente di colaggio (v_E)

$$v_E = \frac{k_e P}{S_{ez}} \quad ; \quad (6.4.5)$$

dove:

k_e = coefficiente di equivalenza;

P = perimetro [cm];

S_{ez} = sezione [cm²].

Di seguito riportiamo alcuni dati di produttività dell'acciaio in funzione dello spessore della bramma.

Spessore bramma [mm]	Verticale	Verticale con incurvamento	Curva	Portata acciaio [kg/min]
	Larghezza bramma [mm]	Peso bramma [kg/m]	Velocità colata [m/min]	
100	500	360	1.20-1.60	430-580
150	750	820	0.88-1.22	720-1000
150	1000	1100	0.88-1.22	970-1220
200	750	1100	0.70-1.00	770-1100
200	1000	1470	0.70-1.00	1030-1470
200	1500	2200	0.70-1.00	1540-2200
250	1500	2750	0.55-0.80	1500-2200
250	2000	3670	0.55-0.80	2010-2940

Tabella 6.2: Costo del processo espresso in unità fittizia w.

CAPITOLO 6

Gli stessi dati li possiamo ricavare dal seguente grafico.

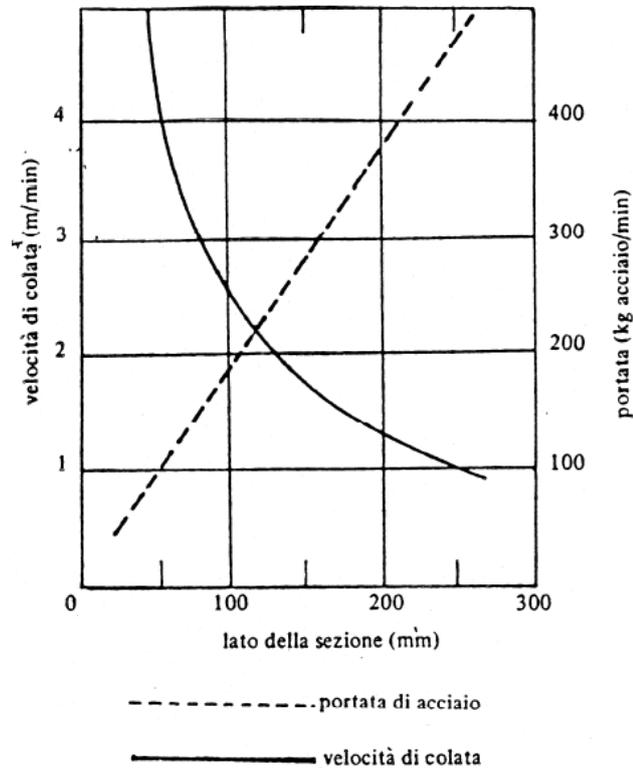


Figura 6.7: Spessore della pelle.

L'acciaio che entra in lingottiera perde calore, dando luogo alla formazione della PELLE, che continua a scendere a contatto con la lingottiera. La contrazione volumetrica dovuta alla solidificazione permette il distacco della barra dalla parete della lingottiera. Il distacco completo avviene nella parte inferiore della lingottiera.

Per avere uno spessore di pelle più elevato occorre "accompagnare" la barra.

Si è passati da lingottiere a facce parallele a lingottiere coniche: Aumentando la conicità, aumenta la consistenza della pelle e aumenta l'efficienza dello scambio termico tra lingottiera e acciaio.

Lo scambio termico in lingottiera è influenzato anche da:

- temperatura di colaggio: se è elevata, si forma una pelle troppo sottile; sono preferibili temperature relativamente basse;

- composizione chimica dell'acciaio: C \leq 0.20%: scambi termici minori
Al, Mn, P, S favoriscono gli scambi termici;
- intensità del raffreddamento primario: alte portate di acqua: brusco
raffreddamento dell'acciaio velocità di solidificazione elevata: rapido
ritiro della barra, formazione di distacco diminuzione efficienza scambio
termico;
- lubrificazione della lingottiera: se effettuata con olio, si hanno fenomeni
di crackizzazione dell'olio stesso e buoni scambi termici.

6.5 Controlli

Lingottiere: stato di usura, geometria, allineamento con i rulli di piede
Durezza e pH dell'acqua di raffreddamento primario e secondario
Spruzzatori raffreddamento secondario esenti da incrostazioni
Allineamento complessivo macchina
Efficienza levismi di paniera e siviera
Efficienza centralina comando apertura cassetto siviera
Affidabilità e taratura strumentazione
Efficienza sistemi di sicurezza
Disponibilità e rispondenza dei materiali di esercizio
(polveri, refrattari, materiali di raffreddamento)

Operazioni preparatorie:

Ripreparazione rivestimento paniera
Montaggio refrattari di colaggio (scaricatori, aste, tuffanti)
Montaggio cassetto
Preriscaldamento siviera e paniera
Preparazione teste falsa billetta

Manutenzione:

Documentazione per diagnosi guasti
Procedure riparazioni e sostituzioni
Ricambi già assemblati
Lay-out impianto per favorire rapidità di sostituzione e accessibilità
Esperienza su frequenza interventi
Archivio tempi e risorse necessarie per interventi manutentivi

6.6 Innovazioni

Colata continua orizzontale

Una nuova tipologia impianto di colata continua è quello orizzontale, di seguito riportiamo uno schema di base.

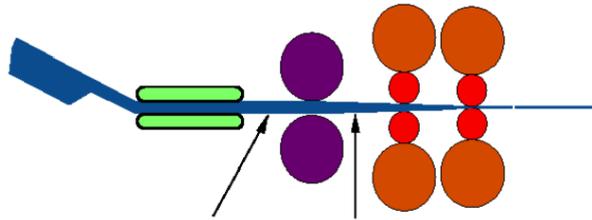


Figura 6.8: Spessore della pelle.

In questo caso si ha il trascinarsi della falsa barra e del prodotto colato, inoltre si ha un movimento oscillatorio orizzontale (120-140 cicli al minuto).

Stirring

Un'ulteriore innovazione può essere definita dai sistemi di stirring elettromagnetico.

La pressione del campo magnetico agente alla superficie del bagno fuso tende a dirigere il fuso, a spingerlo verso l'interno del crogiolo, realizzando così l'effetto di contenimento (pinch effect).

Tale condizione di confinamento elettromagnetico è anche una diretta conseguenza delle interazioni che avvengono fra il fuso e le forze elettromagnetiche coinvolte nell'intero processo e che dipendono anche dalla particolare geometria del crogiolo.

Di seguito viene riportato il risultato di un lavoro di simulazione che evidenzia il passaggio attraverso alcune configurazioni della carica durante il processo di fusione fino a raggiungere la tipica forma caratteristica dovuta all'effetto di confinamento elettromagnetico.

Sono stati selezionati alcuni fotogrammi dalla sequenza continuativa della simulazione animata per evidenziare alcuni importanti passaggi.

In particolare si osserva:

-il trasferimento di calore dall'induttore alla carica inizia dagli stati più esterni; questa fase coincide con il trasferimento di energia verso il materiale allo stato solido contenuto nel crogiolo, dovuto all'iniziale trasferimento di potenza utile verso la carica.

COLATA CONTINUA

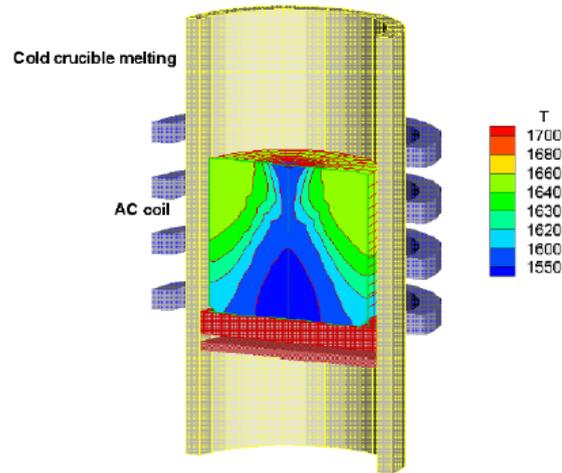


Figura 6.9: Spessore della pelle.

-in un generico momento durante il transitorio termico, le forze interne alla carica, che guidano il movimento della massa durante il riscaldamento, si trasmettono agli strati interni per attrito viscoso (le forze elettromagnetiche all'interno della carica agiscono entro lo skin depth); il calore agli strati più interni si propaga durante questo transitorio e le forze coinvolte continuano a variare la configurazione d'equilibrio del menisco.

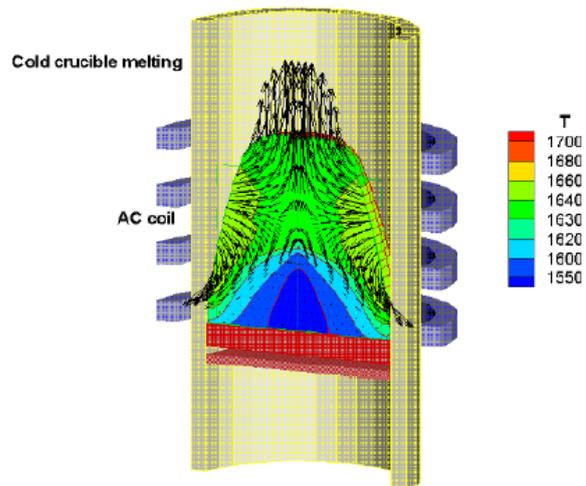


Figura 6.10: Spessore della pelle.

CAPITOLO 6

-la tipica forma raggiunta dalla carica per l'effetto di contenimento, il pinch effect

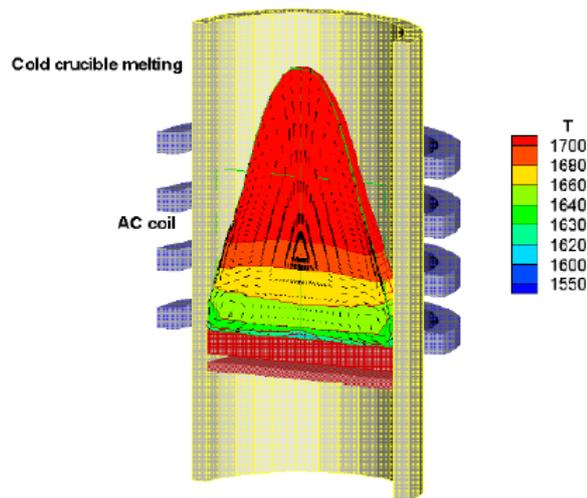


Figura 6.11: Spessore della pelle.

In generale le velocità non superano i 0,5 m/s per avere un effetto di agitazione desiderato.

Questo processo è anche uno tra i più dispendiosi di energia elettrica.

Polveri di copertura e di lubrificazione

La variazione del flusso termico lungo la lingottiera presenta un massimo di densità in corrispondenza del menisco. L'entità di tale massimo aumenta con la velocità di estrazione. Nella parte bassa della lingottiera la densità del flusso termico diminuisce notevolmente, divenendo inferiore a quella ottenibile con spruzzi d'acqua.

Si usano anche polveri di copertura che influenzano la densità del flusso termico lungo la lingottiera.

Le polveri di colata continua svolgono i seguenti compiti:

- 1 - riducono il contatto atmosfera - superficie dell'acciaio liquido evitando così la ri-ossidazione superficiale,
- 2 - isolano termicamente l'acciaio dalla perdita di calore per irraggiamento,
- 3 - conglobano e sciolgono le inclusioni non metalliche per evitare che rimangano intrappolate nella pelle in via di solidificazione,
- 4 - formano un film lubrificante omogeneo tra l'acciaio fuso e la lingottiera,

COLATA CONTINUA

facilitando l'estrazione della barra

5 - controllano e rendono uniforme il trasferimento di calore tra la barra e la superficie della lingottiera, per ridurre le tensioni derivanti dalla differenza di temperatura esistente nello spessore della pelle solidificata.

Le polveri di colata continua devono avere le seguenti caratteristiche:

- ottimale velocità di fusione,
- garanzia di copertura omogenea della superficie dell'acciaio liquido,
- buona spandibilità,
- non sinterizzare né depositarsi sullo scaricatore sommerso,
- non corrodere lo scaricatore sommerso,
- rendere possibile l'effettuazione di un elevato numero di sequenze.
- consentire la formazione di marche d'oscillazione regolari.

CAPITOLO 6

Capitolo 7

Bibliografia

Tesi Pradal

- Tesi Pradal.
- L. Iuliano, Manuale della fonderia, Tecniche nuove, Milano 2007, capitoli 1,2.
- K. B. Rundmann, Metal casting, Michigan Tech. University, capitolo1.
- G. Bootroyd, P. Dewhurst, W. Knight, Product design for manufacture and assembly, Marcel Dekker, New York 2002, capitoli 3,4,5.
- G. Pahl, W. Beitz, Engineering Design, English Edition, The design council, London 1984.
- C. Blum, Early cost estimation of die cast components, M.S. tesi, University of Rhode Island, Kingston, 1989.
- G. B. Bralla, Handbook of product design for manufacturing, McGraw-Hill, New York, 1986.
- H. Fredriksoon, U. Akerlind, Material processing during casting, Wiley, British Library 2006, capitoli 1,3.
- D. Pocci, L. Iuliano, Guida all'impiego dei componenti microfusi, Tecniche nuove, Milano 2001, capitolo 1.
- G. Kobrak, Design and early cost estimation of sand casting, thesis, University of Rhode Island, 1993.
- P. Dewhurst, C. Blum, Support analyses for the economic assessment of die casting in product design, annals CIRP.

CAPITOLO 7

- Kalpahjian, Schmid, -manufacturing processes for engineering materials, Prentice Hall, 2003.
- Applicazioni Industriali Metallurgiche, La Colata dell'Acciaio in lingottiera, Università di Padova, capitolo 6.
- Sistemi per il rimescolamento elettromagnetico di compositi metallici allo stato fuso
Relatore: Prof. Giuseppe Chitarin
Laureando: Fabio Salandin
- Tesi di Ing. Carlo Talamonti Correlatore Ing. Domenico Capodilupo
- E Mareschi, G. Papuli. "La grande siderurgia a Terni", CE:ST:R:E:S, 1986, capitolo 6.
- W. Nicodemi, "Siderurgia: processi ed impianti", Associazione italiana metallurgia, 1990, capitolo 6.
- A Bartocci, E. Marianeschi, "I metalli e l'acciaio", Poligrafico Alterocca Terni, 1947, capitolo 6.
- F. Smith, "Scienza e tecnologia dei materiali", Macgraw Hill, 1990, capitolo 6.
- Rollinger, "Tecnologia siderurgica all'inizio del 2000", 1998, capitolo 6.
- G. Violi, "Processi Siderurgici" Etas Kompass, 1972-74, capitolo 6.
- D. Capodilupo, "Zero Wastes in siderurgia. Un progetto solo per l'ecologia?", Icsim, 2000, capitolo 6.
- G. Pepi "Acciaio: un prodotto ad alta tecnologia", Federacciai, 2001, capitolo 6.
- Internet: www.steel.org, capitolo 6.