

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale**

*Dipartimento di ingegneria industriale*

**TESI DI LAUREA**

in

*Processi E Metodi Di Fabbricazione Per Lo Sviluppo Del Prodotto M*

**SVILUPPO DI MODELLI DI COSTIFICAZIONE DI  
PROCESSI FUSORI IN GRAVITÀ**

CANDIDATO:

Paolo Tagliaferri

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Luca Tomesani

CORRELATORE:

Chiar.mo Prof. Rosario Squatrito

---

Anno Accademico 2012/13

Sessione I



## Ringraziamenti

Si dice che ogni uomo sia il risultato di tutte le interazioni che lo circondano, pertanto se sono arrivato a questo punto lo devo a tutti coloro che mi sono intorno: ringrazio prima di tutto la mia famiglia che mi ha sostenuto nei tanti momenti difficili dandomi fiducia, sicurezza e tanto affetto. Grazie alla mamma Silvia che ha sofferto ogni esame, ogni mio viaggio a Bologna e ogni mio cartellone in camera non smettendo mai di credere in me. Grazie al babbo Fabio perché è l'esempio migliore dell'uomo che voglio diventare. Grazie alla mia sorella Claudia con la quale esiste un legame indissolubile. Ringrazio i miei nonni che mi guardano dall'alto, grazie per avermi insegnato i valori del rispetto e dell'umiltà. Grazie ai nonni Italo e Pierina per l'affetto e la loro presenza in tutto questo percorso. Ringrazio la mia splendida ragazza Elena, punto di riferimento e sostegno continuo, senza di lei sarebbe stato tutto più difficile. Grazie ai miei amici più cari, Simone, Ale e Nicco, perché le cose intorno cambiano ma loro rimangono sempre gli stessi. Grazie a tutti i miei zii perché con loro mi sento sempre come in una sola grande famiglia, in particolare a Sergio e Katia che sento come i miei secondi genitori. Un grazie anche allo zio Gigi per le nostre lunghe discussioni pomeridiane. Grazie alla zia Rossella e allo zio Mario per le loro raccomandazioni e la loro sincera partecipazione emotiva in questo percorso. Grazie ai miei compagni di squadra per le mille discussioni intraprese in questi anni sotto la doccia. Grazie ad un amico speciale con il quale ho condiviso undici anni di studio: Stefano, il miglior compagno che potessi avere, mi mancheranno le nostre giornate insieme, rimarrà sempre un membro della mia famiglia. Ringrazio il "maestro" Teo per lo splendido rapporto che si è creato in questi anni. Grazie a Simone detto "Ciccio" per le sue risate contagiose e la sua ospitalità in casa Manganelli. Grazie a Don Leonardo, mia guida spirituale nei momenti di sconforto e di dubbi ma anche amico fedele. Un grazie ai miei compagni universitari di Firenze: Veronica, Filippo e Cosimo. Grazie ai nuovi amici bolognesi come la Giorgina, il Mancio, Sprocati e la Laurina. Un grazie particolare al Prof. Rosario Squatrito per la disponibilità e la pazienza che mi ha concesso. Un grazie va ai miei amici Stefano e Giada per i nostri caffè delle 14.00 e per le mille discussioni filosofiche. Grazie alle mie amiche Giulia, Melissa, Margherita, Chiarina, Giulia, Elena, Sara, e un grazie a miei amici Stefano, Trastu, Alessino, Fabio, Andrea, Niccolò, Stefano, Riccardo, Matteo, Ettore, Robby, il Torte, Luchino, Francesco, Fabio e il Giro.

*Ai miei genitori  
a Claudia ed Elena  
a Dino e Graziana, Pierina e Italo*

## Sommario

<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	<b>1</b>
<b>SOMMARIO</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1 ANALISI DELLA LETTERATURA</b> .....	<b>13</b>
1.1 MODELLO DEI COSTI SVILUPPATO DALL'UNIVERSITÀ DEL MICHIGAN .....	13
1.1.1 Colata in sabbia.....	14
1.1.1.1 Costi fissi .....	14
1.1.1.2 Costi variabili.....	15
1.1.2 Microfusione o fusione a cera persa.....	15
1.1.2.1 Costi colata.....	16
1.1.3 Pressofusione .....	17
1.1.3.1 Costi fissi .....	18
1.1.3.2 Costi variabili.....	19
1.2 MODELLO DEI COSTI SVILUPPATO DALL'UNIVERSITÀ DI PRETORIA .....	19
1.2.1 Costi di produzione per unità di prodotto.....	20
1.2.2 Costi variabili per unità di prodotto.....	21
1.2.2.1 Costi delle materie prime .....	21
1.2.2.2 Costi energetici delle utenze.....	22
1.2.2.3 Costi per la realizzazione dello stampo.....	22
1.2.2.4 Costi extra .....	23
1.2.3 Costi fissi per unità di prodotto .....	23
1.2.3.1 Costi delle principali macchine .....	23
1.2.3.2 Costi di attrezzaggio.....	25
1.2.3.3 Costi di manodopera degli operai .....	26
1.2.3.4 Costi di installazione delle macchine .....	26
1.2.3.5 Costi di manutenzione delle macchine.....	27
1.2.3.6 Costi di costruzione dello spazio .....	27
1.2.3.7 Costi di attrezzature accessorie.....	27
1.2.3.8 Costi per spese generali totali .....	28
1.2.3.9 Costi di recupero del capitale.....	28
1.3 MODELLO DEI COSTI SVILUPPATO DALL'INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY .....	29

1.3.1 Metodologia di stima del costo.....	30
1.3.1.1 Costo del materiale.....	31
1.3.1.2 Costo del lavoro .....	34
1.3.1.3 Costo dell'energia .....	35
1.3.1.4 Costo di lavorazione delle attrezzature .....	36
1.3.1.5 Costo di spese generali.....	53
<b>CAPITOLO 2 ELABORAZIONE DEL MODELLO PER LA STIMA DEI COSTI.....</b>	<b>54</b>
2.1 COSTO DEI MATERIALI.....	54
2.1.1 Costo della lega metallica .....	55
2.1.2 Costo del materiale per la formatura .....	58
2.1.3 Costo del materiale per le anime .....	59
2.1.4 Costo del materiale isolante .....	60
2.2 COSTO DELLA MANODOPERA.....	61
2.2.1 Tempo di formatura .....	61
2.2.2 Tempo di pulizia del getto.....	62
2.3 COSTO ENERGETICO .....	63
2.4 COSTO DELLE LAVORAZIONI DELLE ATTREZZATURE .....	65
2.5 COSTO DI FINITURA .....	68
2.5.1 Costi dei trattamenti superficiali .....	68
<b>CAPITOLO 3 APPLICAZIONE DEL MODELLO AI CASI.....</b>	<b>71</b>
3.1 COSTO DEL MATERIALE .....	73
3.2 COSTO DELLA MANODOPERA.....	81
3.3 COSTO ENERGETICO .....	85
3.3.1 Variazioni dell'incidenza energetica al variare della lega.....	87
3.4 COSTO DELLE ATTREZZATURE.....	89
3.5 COSTO TOTALE .....	94
3.6 IPOTESI DI REALIZZAZIONE PER GRAPPOLI DEI COMPONENTI .....	102
<b>CAPITOLO 4 ECA CONSULT .....</b>	<b>106</b>
4.1 METAL ONE .....	106
4.2 STRUTTURA DEI COSTI A LIVELLO PREVENTIVO DI METAL ONE .....	107
4.2.1 Criteri utilizzati per il calcolo dei costi dei getti .....	109
4.2.2 Confronto tra la stima dei costi di Metal One e il modello proposto .....	113
<b>CAPITOLO 5 CONCLUSIONI.....</b>	<b>116</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>I</b>



## Introduzione

Questo lavoro di tesi nasce dalla collaborazione dell'Università di Bologna con *ECA Consult* con lo scopo di ottimizzare i software gestionali per le fonderie ampliando il loro raggio di azione in settori come quello del nostro caso specifico ossia della preventivazione dei costi.

Oggi, le aziende nel settore metalmeccanico si trovano ad affrontare concorrenze a livello globale che hanno comportato una notevole pressione per quanto riguarda il tema della riduzione dei costi e i tempi di sviluppo di un nuovo prodotto. Quasi 90 milioni di tonnellate di componenti dal valore di oltre cento miliardi dollari vengono prodotti ogni anno per automobili, macchine industriali e molti altri settori, da oltre 33.300 fonderie in tutto il mondo. Un numero ancora maggiore di aziende sono coinvolte nella progettazione, lavorazione, collaudo e assemblaggio dei componenti e nelle attività connesse, quali la costruzione di utensili e materiale di approvvigionamento. Secondo il censimento del 2010 di Assofond , federazione nazionale delle fonderie, la Cina è il principale produttore e consumatore di getti seguiti da India, Stati Uniti e Germania:

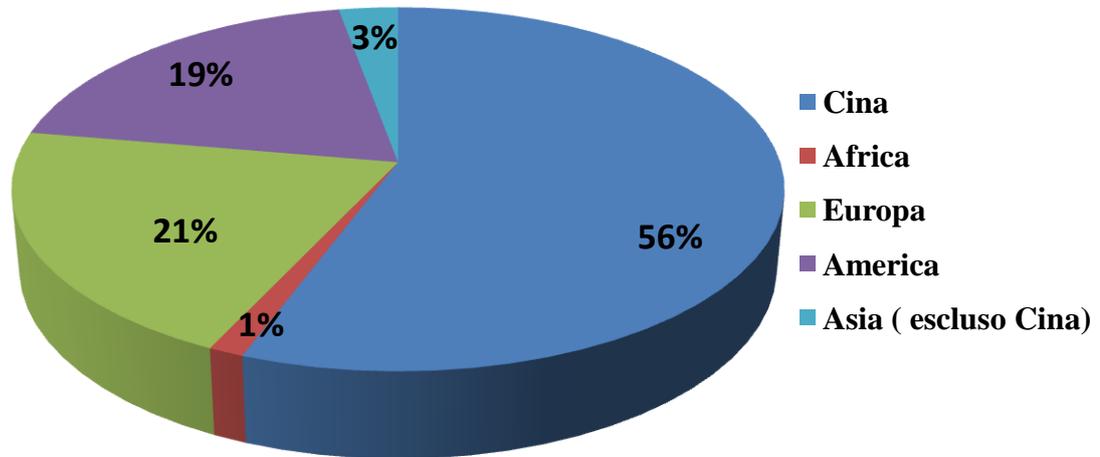
<i>Produttori di getti 2010</i>	<i>Produzione (Milioni di Tonnellate)</i>		<i>Totale (Milioni di Tonnellate)</i>	<i>Quota % sul totale mondo</i>
<b>Cina</b>	Ghisa grigia	19.00	<b>39.60</b>	<b>43.3%</b>
	Ghisa duttile	10.50		
	Acciaio	5.30		
	Non Ferrosi	4.80		
<b>India</b>	Ghisa grigia	6.18	<b>9.05</b>	<b>11,3%</b>
	Ghisa duttile	1.05		
	Acciaio	1.07		
	Non Ferrosi	0.75		
<b>U.S.A.</b>	Ghisa grigia	2.63	<b>8.23</b>	<b>10.3%</b>
	Ghisa duttile	2.75		
	Acciaio	0.98		
	Non Ferrosi	1.87		
<b>Germania</b>	Ghisa grigia	2.18	<b>4.79</b>	<b>6.0%</b>
	Ghisa duttile	1.49		
	Acciaio	0.19		
	Non Ferrosi	0.93		

<i>Produttori di getti 2010</i>	<i>Produzione (Milioni di Tonnellate)</i>		<i>Totale (Milioni di Tonnellate)</i>	<i>Quota % sul totale mondo</i>
<b>Giappone</b>	Ghisa grigia	2.16	<b>4.76</b>	<b>6.0%</b>
	Ghisa duttile	1.35		
	Acciaio	0.21		
	Non Ferrosi	1.04		
<b>Russia</b>	Ghisa grigia	1.74	<b>4.20</b>	<b>5.3%</b>
	Ghisa duttile	1.26		
	Acciaio	0.70		
	Non Ferrosi	0.50		
<b>Brasile</b>	Ghisa grigia	1,91	<b>3.24</b>	<b>4.1%</b>
	Ghisa duttile	0.81		
	Acciaio	0.24		
	Non Ferrosi	0.27		
<b>Corea</b>	Ghisa grigia	1.04	<b>2.23</b>	<b>2,8%</b>
	Ghisa duttile	0.65		
	Acciaio	0.16		
	Non Ferrosi	0.38		
<b>Italia</b>	Ghisa grigia	0.63	<b>1,97</b>	<b>2,5%</b>
	Ghisa duttile	0.40		
	Acciaio	0.06		
	Non Ferrosi	0.87		
<b>Francia</b>	Ghisa grigia	0.62	<b>1.95</b>	<b>2.1%</b>
	Ghisa duttile	0.92		
	Acciaio	0.08		
	Non Ferrosi	0.33		

*Tabella 1 - Top Ten dei produttori di getti nel 2010*

La Cina continua ad essere di gran lunga il maggior produttore mondiale di getti ferrosi e non ferrosi con 39.6 milioni di tonnellate, il 43.3% del totale. Nel 2010 la produzione è cresciuta del +12%, in accelerazione rispetto all'aumento del +5% del 2009.

La produzione di getti realizzata in Asia nel 2010 è stata pari al 68% del totale mondiale. L'Europa nel suo insieme continua ad essere la seconda area di produzione di getti al mondo con il 16%. India e USA continuano a contendersi il secondo e terzo posto. Il Brasile e la Corea del Sud hanno anch'esse mantenuto il settimo e l'ottavo posto, mentre l'Italia risale al nono posto cedendo il decimo alla Francia.



*Figura 1 - Produzione getti nel mondo nel 2010*

Per quanto riguarda nello specifico la situazione italiana nel 2011 è stata constatata la presenza di circa 1.100 fonderie che occupano 29.340 addetti con un valore di produzione pari a 7.5 Miliardi di Euro e 2.2 Milioni di tonnellate di getti. Con 978.280 tonnellate di getti non ferrosi ed un delta di circa 500 tonnellate l'Italia si riappropria della leadership Europea in ambito non Ferroso.

Il primato conteso alla Germania era stato momentaneamente accantonato a causa delle nefaste conseguenze della crisi che hanno visto il nostro Paese fortemente penalizzato. Rimane il secondo produttore di getti ferrosi con 1.236.229 tonnellate dopo la Germania e prima della Francia (produzione di tubi esclusa).

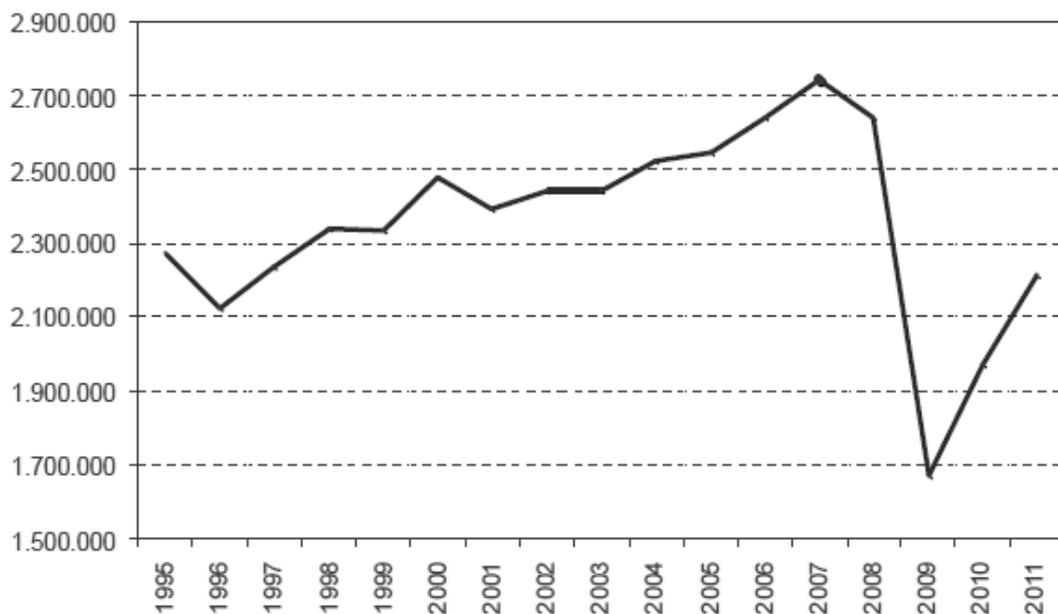


Figura 2 - Andamento nel tempo della produzione di getti in Italia (tonnellate)

A fine 2011 il tessuto produttivo delle Fonderie italiane risultava costituito da 1.111 Fonderie di cui: 154 di ghisa, 26 di acciaio e 17 di microfusione, per un totale di 197 Fonderie di metalli ferrosi e 914 unità di metalli non ferrosi.

Questo settore oggi si trova ad affrontare molte sfide: da un lato, deve soddisfare le crescenti aspettative dei clienti in termini di qualità, di tempi di realizzazione e di costi sempre più competitivi; d'altro, le fonderie subiscono il sorpasso tecnologico di gestione in atto negli altri settori manifatturieri: un esempio è il crescente utilizzo di macchine CNC per le operazioni di finitura, che richiedono getti con durezza superficiale uniforme per evitare di danneggiare gli utensili da taglio. Un altro esempio è l'adozione della filosofia Just-In-Time da parte degli assemblatori che richiede alle fonderie una fornitura on-time. Inoltre la crescente pressione da parte degli organismi di regolamentazione in termini di energia per la tutela dell'ambiente e la sicurezza operativa è una ulteriore preoccupazione e difficoltà per il settore.

Il settore delle lavorazioni meccaniche ha avuto una crescita e uno sviluppo tecnologico considerevole in termini di processi, attrezzature, controllo, ottimizzazione e affidabilità, come si può notare dalla grande mole di pubblicazioni di ricerca, riviste di settore tra gli ingegneri. I processi fusori per molti anni sono stati invece considerati una terra di nessuno tra le discipline meccaniche e metallurgiche, aggravati dalla difficoltà di attrarre e mantenere personale qualificato in tale settore, sia nel mondo in-

dustriale che accademico: questo è uno dei motivi per cui in tale settore vi è stata molto meno ricerca e sviluppo rispetto ad altri processi di fabbricazione.

Negli ultimi 20 anni i processi fusori sono tornati oggetto di studio e ricerca grazie alla nascita e allo sviluppo di metodi di analisi numerica atti a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali che descrivono l'andamento fluidodinamico e di solidificazione dei materiali.

Una buona stima dei costi ha un impatto diretto sulle prestazioni e l'efficacia di una impresa dato che una sovrastima può provocare la perdita di clienti, mentre una sottovalutazione può portare a perdite finanziarie per l'impresa. A causa di questo ruolo delicato e cruciale in una organizzazione, la stima dei costi è un punto fondamentale sia per le strategie progettuali e operative che per le politiche gestionali e decisionali dell'azienda. Per questo negli ultimi anni si stanno studiando modelli per la stima dei costi che portino a trovare quale sia la soluzione progettuale ottimale nella massima soddisfazione del cliente in termini di alta qualità a basso costo e consegna del prodotto nel tempo.

È stato constatato che oltre il 70% del costo totale dello sviluppo di un prodotto è da attribuirsi alla fase di progettazione, anche se questa fase rappresenta meno del 7% del totale costo (Hundal 1993).

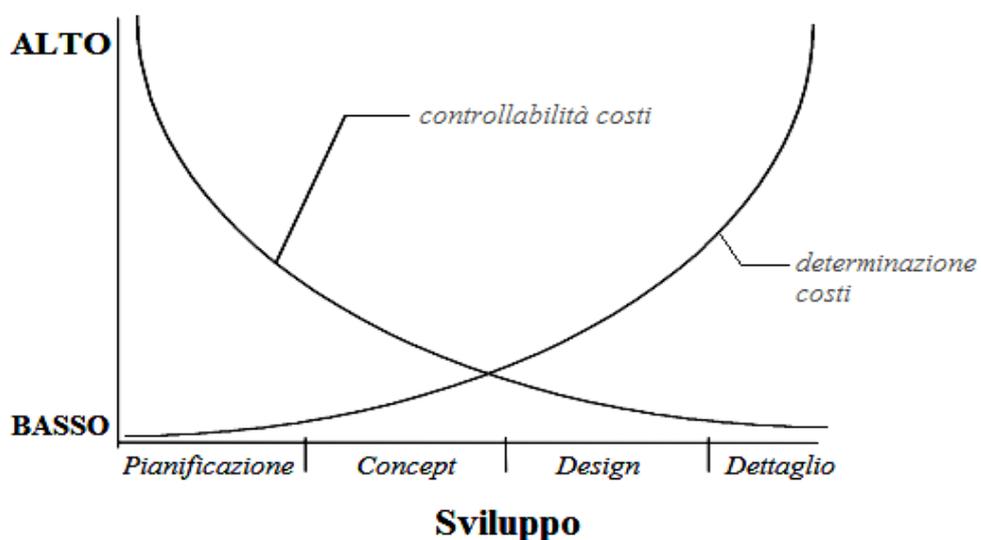


Figura 3 - Determinazione dei costi nei vari step di sviluppo

Destinare maggiori risorse per l'identificazione e la prevenzione di potenziali problemi di produzione nelle fasi di progettazione riduce notevolmente il costo complessivo e il lead-time. Uno strumento di stima dei costi diventa utile, o forse addirittura indispensabile, per agevolare le decisioni su una scelta tra diverse alternative sfruttando i parametri geometrici, i materiali e i diversi processi. Esso consente di studiare l'effetto di diversi modelli di costo di fabbricazione. L'uso di un modello matematico di stima può anche essere usato in maniera iterativa per verificare se può essere raggiunto un costo potenziale (design to cost). Con l'intensificazione della concorrenza globale, la stima dei costi in fase di progettazione sta suscitando notevole interesse tra i ricercatori.

La maggior parte delle fonderie non è attrezzata per elaborare e ottenere i dati di costo in maniera dettagliata. La modifica del processo fusorio ha una valenza significativa per la riduzione dei costi rispetto ad altre lavorazioni successive (lavorazioni di finitura, distaffatura) in quanto comporta una scarsa modifica del design del pezzo iniziale migliorando così la compatibilità tra prodotto e processo. Tuttavia, una conoscenza limitata sui processi e insufficienti informazioni in merito alle possibilità e le capacità, fanno sì che il progettista non possa essere in grado di stimare con precisione i costi di colata, soprattutto per prodotti nuovi. Anche progettisti che posseggono informazioni adeguate, spesso non sono in grado di raggiungere ugualmente un'adeguata stima dei costi a causa della mancanza di strumenti adatti.

Esistono diversi tipi di approccio di stima dei costi del prodotto in fase di progettazione oggi disponibili in letteratura:

– *Metodo intuitivo*

Il metodo intuitivo si basa sull'esperienza dello stimatore, che fa uso della propria interpretazione per risolvere il problema. Questo metodo è ancora in pratica in piccoli laboratori artigianali (Nagahanumaiah et al 2005; Chougule & Ravi,2006).

– *Metodo analogico*

Prevede il confronto di un nuovo prodotto con degli analoghi già esistenti (*Duverlie & Castelain*)

– *Metodo analitico*

Prevede la decomposizione in parti elementari con, per ogni parte, l'elaborazione di equazioni empiriche utilizzate per la stima del costo dei vari compiti a seconda

delle caratteristiche di ognuna (Feng et al. 1996, Ou-Yang e Lin 1997).

– *Metodo di funzione di base*

Utilizza caratteristiche geometriche (come slot, foro e nervatura) del prodotto e utensili come base per la stima dei costi .

– *Metodi di stima dei costi parametrici*

Metodi che comportano la formulazione di relazioni tra caratteristiche del prodotto e del suo costo utilizzando dati disponibili.

L'elaborato di tesi prevede una prima presentazione dei modelli per la stima preventiva dei costi presenti in letteratura, poi verrà specificato nel dettaglio il modello dei costi da noi sviluppato sulla base della letteratura proposta. Infine verificheremo il modello proposti con dei casi applicativi.

## Capitolo 1      **Analisi della letteratura**

Sono stati analizzati tre modelli dei costi trovati in letteratura. L'ordine di citazione di tali modelli cerca di avere una logica top – down, ovvero partendo dal modello più generico fino ad arrivare a quello ritenuto più dettagliato.

I tre modelli sono:

1. Modello dei costi sviluppato dall'“Università del Michigan” (William Lovejoy)
2. Modello dei costi sviluppato dall'“Università di Pretoria “ (N. S. Tlale)
3. Modello dei costi sviluppato dall'“Indian Institute of Technology” (Dott. B. Ravi)

Tali modelli sono concepiti per i progettisti con poca conoscenza del processo, in modo che essi possano modificare il progetto in fase di sviluppo, quando il costo di tali modifiche è ancora basso. Sono state sviluppate equazioni analitiche per stimare i costi relativi al materiale e alla conversione (energia e lavoro). In seguito analizzeremo singolarmente ciascun modello nello specifico.

### *1.1 Modello dei costi sviluppato dall'università del Michigan*

Il modello dell'università del Michigan descrive linee guida sulla progettazione e sui costi dei processi fusori esaminando le tre diverse tipologie: la colata in sabbia, la microfusione e la pressofusione. Analizzeremo in seguito uno ad uno i tre processi.

### 1.1.1 Colata in sabbia

È una delle tecniche più versatili poiché permette la realizzazione di prodotti con grandi dimensioni, disegni variabili e buona qualità, unite ad un'apprezzabile economicità. Tale tecnica non può essere utilizzata per colate ad alta precisione a causa dell'impossibilità da parte della sabbia di seguire perfettamente uno stampo complesso e per le inevitabili variazioni dimensionali che si verificano al momento della rimozione dello stesso.

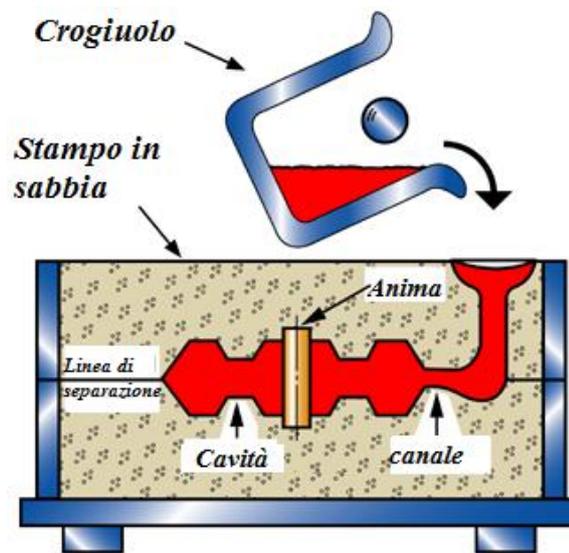


Figura 1.1. Schema del processo di colata in sabbia

#### 1.1.1.1 Costi fissi

Il costo fisso espresso in dollari di una colata è dato dalla formula:

$$C_{fisso} = R_t (0,313N_{sp}^{1,27} + 0,085A_p^{1,2}) n^{0,7} \quad (1.1)$$

Dove

$$R_t = \text{costi attrezzaggio ( per la letteratura sono quantificabili in } \frac{40 \$}{h} \text{)}$$

$N_{sp}$  = Numero di superficie "patch"

È il numero di parti o aree continue che possono essere lavorate senza sollevare l'utensile (esempio: un disco avrà  $N_{sp}=3$ : la superficie superiore, la superficie inferiore, e il bordo; un disco con un foro al centro avrà quattro patch.)

$A_p$  = Area getto in  $cm^2$

$n$  = numero di getti (inferiore o uguale a  $N$ )

### 1.1.1.2 Costi variabili

Il costo variabile dei materiali di colata per le parti espresso in dollari  $N$  sarà:

$$C_{variabili} = 1,03 N m \rho V \quad [\$] \quad (1.2)$$

$N$  = numero di cavità per ciclo

$n$  = numero di getti (inferiore o uguale a  $N$ )

$V$  = volume della parte da gettare, in  $cm^3$

$\rho$  = densità  $\left[ \frac{Kg}{cm^3} \right]$

$m$  = costo in dollari di materiale  $\left[ \frac{\$}{Kg} \right]$

### 1.1.2 Microfusione o fusione a cera persa

Questa tecnica utilizza modelli in cera realizzati per stampaggio ad iniezione in uno stampo metallico, poi montati su un albero con sistemi di alimentazione. Il modello in cera viene immerso in un materiale refrattario, poi coperto in stucco anch'esso refrattario, e lasciato asciugare per ore. Questa procedura viene ripetuta in genere circa otto volte. il metallo fuso viene colato nel guscio ceramico e per garantire un riempimento completo viene utilizzata o la pressione dell'aria stessa, o il vuoto o la pressione centrifuga. Il processo è adatto per la maggior parte dei metalli con punti di fusione sotto 2500K. Tale tecnica è adatta a forme molto complesse,

con contorni marcati e nicchie . Il processo richiede utensili di precisione per i modelli in cera oltre ad un lungo tempo che va ad aumentare il costo di tale tecnica.

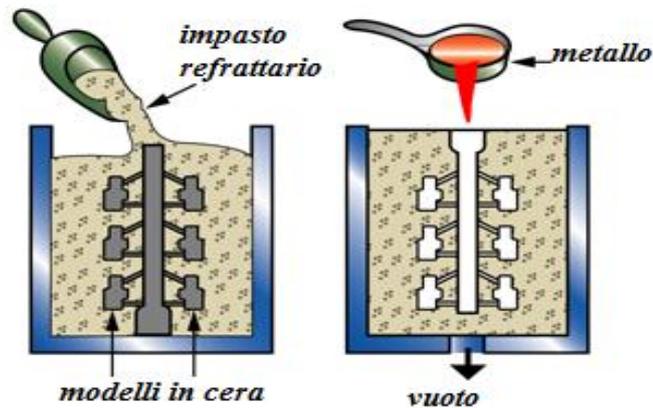


Figura 1.2. Schema del processo di fusione a cera persa

### 1.1.2.1 Costi colata

Il costo in dollari di una colata a cera persa è data dalla somma dei costi dei materiali dello stampo, dell'attrezzaggio, della produzione stessa dello stampo e della complessità del pezzo:

$$C_{colata} = C_{base\ stampo} + C_{attrezzaggio} + C_{produzione\ stampo} + C_{complessità} \quad (1.3)$$

Nel dettaglio andremo ad analizzare i quattro contributi che compongono il costo totale:

$$C_{base\ stampo} = 1000 + 10,58A (d + 6)^{0,4} \quad (1.4)$$

$$C_{attrezzaggio} = 2700(0,08 + 0,02 SP)^{1,27} \quad (1.5)$$

$$C_{produzione\ stampo} = 75A^5 + 2700 \cdot (0,08 + 0,04 \cdot SP)^{1,27} + 300 + 120 \cdot A^{1,2} \quad (1.6)$$

$$C_{complessità} = 300 + 120A^{1,2} \quad (1.7)$$

$A$  = Area del quadrato che racchiude le parti dello stampo ( $cm^2$ )

$d$  = profondità dello stampo (cm)

$SP$  = numero di patch di superficie

### 1.1.3 Pressofusione

La pressofusione o pressocolata è un particolare processo di fonderia in forma permanente, in cui il metallo fuso viene iniettato ad alta pressione in uno stampo metallico.

Lo stampo, è costituito da due semi-stampi generalmente di acciaio o ghisa, per cui i metalli utilizzati nel processo saranno tutti i materiali che fondono a temperature minori, come leghe di alluminio, zinco o magnesio. La pressione d'iniezione del metallo fuso può variare dai 2 ai 150 MPa a seconda dei casi: la pressione viene mantenuta per tutta la durata del processo fino ad avvenuta solidificazione, mentre delle presse idrauliche garantiscono la chiusura dello stampo anche ad elevate pressioni di esercizio. A garantire il raffreddamento del pezzo, vi è un sistema di circolazione di liquido all'interno dello stampo. Una volta solidificato e raffreddato il pezzo, le presse aprono i due stampi in modo che esso possa essere prelevato.

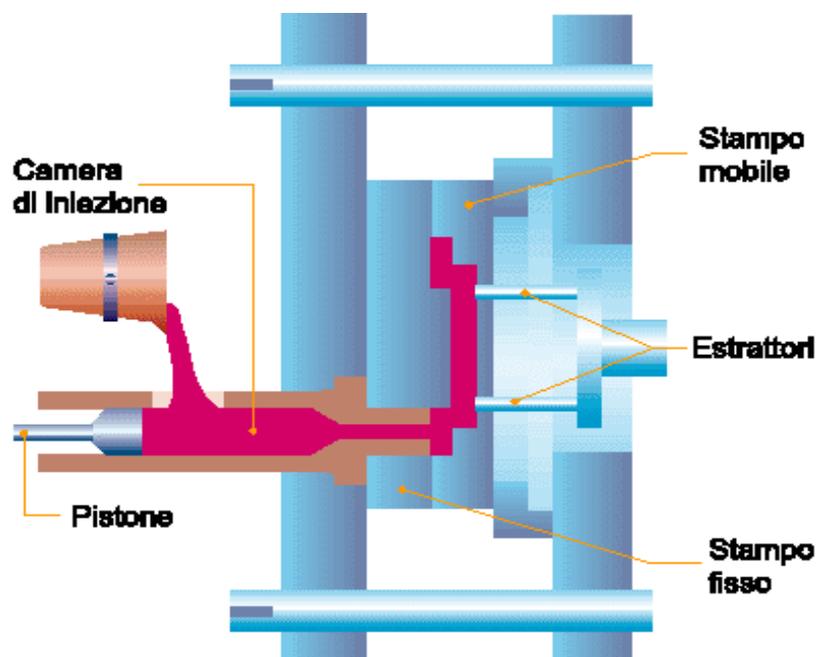


Figura 1.3 - Schema del processo di pressofusione

In questa tecnica è importante considerare il tempo di raffreddamento, calcolato in funzione di una variabile che tiene conto del materiale dello spessore massimo della parete  $h_{max}$ :

$$T_C = \beta h_{max} \text{ (secondi)} \quad (1.8)$$

Il valore di  $\beta$  varia a seconda del materiale come da tabella seguente:

Metallo	$\beta$
Leghe di zinco	0,4
Leghe di alluminio	0,47
Leghe di rame	0,63
Leghe di magnesio	0,31

Tabella 1.1 - Coefficiente  $\beta$  per le diverse leghe

### 1.1.3.1 Costi fissi

I costi fissi espressi in dollari sono costituiti da costo del materiale della base dello stampo e il costo di produzione dello stampo stesso:

$$C_{fisso} = C_{base\ stampo} + C_{produzione\ stampo} \quad (1.9)$$

$$C_{base\ stampo} = 1000 + 10,58A (d + 6)^{0,4} \quad (1.10)$$

$$C_{produzione\ stampo} = 75A^5 + 2700 \cdot (0,08 + 0,04 \cdot SP)^{1,27} + 300 + 120 \cdot A^{1,2} \quad (1.11)$$

dove

$A$  = Area del quadrato che racchiude le parti dello stampo ( $cm^2$ )

$d$  = profondità dello stampo ( $cm$ )

$SP$  = numero di patch di superficie

### 1.1.3.2 Costi variabili

Il costo variabile per parte è il costo dei materiali, più il costo tempo di raffreddamento

$$C_{variabile} = C_{materiale} + C_{tempo\ raffreddamento} \quad (1.12)$$

dove

$$C_{materiale} = 1,03 \cdot C_{materiale\ per\ una\ iniezione} \left[ \frac{\$}{iniezione} \right] \quad (1.13)$$

$$C_{tempo\ raffreddamento} = \frac{\beta h_{max}}{60} \left[ \frac{\$}{iniezione} \right] \quad (1.14)$$

## 1.2 Modello dei costi sviluppato dall'università di Pretoria

Il modello sviluppato dall'università di Pretoria ha lo scopo di valutare e analizzare il costo totale di produzione di ogni processo di fabbricazione, e per studiare come il costo totale sia influenzato da altre variabili di produzione quali volume, tipo di costo e materiale dei componenti.

Il Modello di costo usato è l'Activity Based Costing (ABC): una tecnica di stima dei costi che analizza l'economia di produzione, usando diversi elementi divisi in categorie di costi fissi e variabili.

L'ABC si può distinguere in cinque fasi necessarie:

- *Analisi di Attività*

L'azienda deve anzitutto comprendere esattamente quali attività svolge.

- *Raccolta dati relativa ai costi*

Fase di analisi accurata tramite dati reali o tramite formule di assegnazione dei costi necessari alla ditta per esistere e produrre: stipendi, investimenti in ricerca, macchinari di vario tipo.

– *Riconduzione dei costi alle rispettive attività*

Questa fase somma l'input di attività e l'input di costi, per ottenere l'input totale, cioè tutto quanto una ditta "mette in gioco" per generare il suo prodotto o servizio. Lo scopo non è ancora il calcolo matematico dei costi, quanto piuttosto individuare con esattezza da dove questi provengano.

– *Calcolo dell'Output*

Questa fase si occupa di calcolare il reale ammontare dei costi per unità produttiva. Il costo della unità produttiva, è dato dal costo input totale diviso il volume di output della attività produttiva principale. Ciò permette di stabilire quanto effettivamente consumino (denaro, tempo, personale, ecc) le differenti attività. Il totale di consumo di ciascuna attività è aumentato dal costo dell'unità produttiva che se ne occupa e va ad aggiungersi come costo complessivo di attività aziendale.

– *Analisi dei costi*

Questo metodo tuttavia richiede che siano conosciute le informazioni sui processi coinvolti nella produzione del prodotto o componente.

### *1.2.1 Costi di produzione per unità di prodotto*

I costi di produzione totali  $C_T$  sono la somma del totale dei costi variabili  $C_V$  e del totale dei costi fissi  $C_F$ . I costi totali si basano su volumi di produzione annuali  $n$  del componente richiesto.

$$C_T = C_V + C_F \quad (1.15)$$

### 1.2.2 Costi variabili per unità di prodotto

I costi variabili sono composti dai costi delle materie prime, da quelli energetici delle utenze, dalla realizzazione degli stampi e da una voce extra che comprende altri beni di consumo:

$$C_V = C_{mat} + C_{energ} + C_{stamp} + C_{extra} \quad (1.16)$$

Andremo ad analizzare ogni singolo elemento dell'equazione.

#### 1.2.2.1 Costi delle materie prime

I costi delle materie prime per unità di prodotto sono espressi dalla formula:

$$C_{Mat} = \left( \frac{w \cdot P_{mat}}{1-S} \right) \quad (1.17)$$

dove

$P_{mat}$  = prezzo delle materie prime in Kg

$w$  = peso totale del materiale di scarto prodotta per componente finale, dopo i successivi processi di taglio e finitura

$S$  = Tasso di scarto  $S = \frac{w_s}{w}$

$w_s$  = peso totale del componente finale in Kg

$w$  = peso totale del materiale di scarto prodotta per componente finale, dopo i successivi processi di taglio e finitura

Il tasso di scarto è la misura della quantità di materia prima che non diventa incorporata nel prodotto finale, compreso quello che viene eliminato dalle finiture.

### 1.2.2.2 Costi energetici delle utenze

Il costo energetico delle utenze per unità di prodotto è specifico per ogni materiale poiché ogni materiale ha una diversa temperatura latente di fusione durante il processo.

Tale costo può essere descritto dalla seguente equazione:

$$C_{energ} = w \cdot \bar{E} \cdot C_E \cdot f_{reg\ utenze} \quad (1.18)$$

dove

$\bar{E}$  = Energia media (riscaldamento, raffreddamento, trasporto meccanico)  
consumata per Kg di materiale che viene lavorato

$C_E$  = costo di energia per chilogrammo del componente costruiti  $\frac{R}{KWh}$

$f_{reg\ utenze}$  = fattore di regolazione del consumo delle utenze

### 1.2.2.3 Costi per la realizzazione dello stampo

La realizzazione di uno stampo è un intervento complesso, che in produzioni di dimensioni o peso sostenuto dei prodotti può incidere notevolmente. Alcuni stampi possono arrivare a costare qualche centinaia di migliaia di euro. La letteratura affronta il problema della realizzazione e progettazione degli stampi, riportando i principali problemi degli stampi con le possibili soluzioni.

- Problemi estetici di prodotti: risolto utilizzando leghe particolari o personalizzate
- Produttività: studio di modifiche stampo
- Inserti non adatti alla pressofusione: risolto individuando fornitori terzi di prodotti innovativi
- Costi rifacimento stampi: studiate lavorazioni aggiuntive

#### 1.2.2.4 Costi extra

Tale voce comprende i costi totale di inserti e altri beni di consumo per unità, in letteratura tale voce non è stata approfondita data la variabilità che tale voce può avere per le diverse aziende.

#### 1.2.3 Costi fissi per unità di prodotto

I costi fissi vengono suddivisi in costi per l'acquisto delle macchine principali e ausiliari e nei relativi costi per le installazioni , costi di manodopera degli operai, costi di manutenzione , costi di costruzione e costi per spese generali.

$$C_F = C_{Macc} + C_{attrez} + C_{manod} + C_{Inst} + C_{manut} + C_{costr} + C_{aux} + C_{altri} + C_{rec\ cap} \quad (1.19)$$

Andremo adesso ad analizzare ogni singolo elemento dell'equazione

##### 1.2.3.1 Costi delle principali macchine

I costi delle principali macchine per unità di prodotto è data dalla formula:

$$C_{Macc} = \frac{n_m e^{(M_1 \log w + M_2)} f_{costo\ macc}}{L_m} \quad (1.20)$$

dove

$M_1, M_2 =$  coefficienti di regressione ottenuti dal grafico  $\frac{\log(\text{prezzo macch})}{s \log(\text{peso})}$

$f_{costo\ macc} =$  fattore di regolazione del costo della macchina secondo il mercato

$L_m =$  vita della macchina  $= M_{La} \cdot f_{mat\ usato}$

dove

$M_{La}$  = ammortamento della vita della macchina negli anni

$f_{mat\ usato}$  = fattore di regolazione del materiale che usato sulla macchina

(ad esempio i metalli duri riducono la vita delle macchine)

$n_m$  = numero totale di macchine nella linea di produzione in parallelo

$$n_m = \frac{T_C \cdot n}{e_p \cdot n_d \cdot n_s \cdot n_{ore}} \quad (1.21)$$

dove

$n$  = numero di prodotti richiesti in un anno

$W_{D.L.}$  = salario per ogni ora di lavoro diretto

$n_L$  = numero di operai necessari per la produzione di uno componente

$n_d$  = numero di giorni lavorativi per anno civile

$n_s$  = numero di turni giornalieri di lavoro

$n_{ore}$  = numero di ore di lavoro per turno

$e_p$  = produttività o efficienza del processo di fabbricazione

La produttività è determinata come rapporto tra le ore totali di produzione della macchina e il totale delle ore di accensione della stessa.

$T_C$  = tempo di ciclo medio per fabbricare un componente

Il tempo di ciclo è regolato sia dal materiale (con le sue proprietà di conduzione del calore e solidificazione) che dalla geometria del componente (con sezioni e spessori che possono comportare tempi di solidificazione diversi). I tempi di ciclo che sono stati utilizzati in questo studio sono stati determinati dai dati empirici e sono stati poi regolati per i diversi materiali . Per questo l'uso della formula del tempo di ciclo è, secondo quanto riportato dalla letteratura, non del tutto affidabile e difficilmente “e-  
spandibile” ad altri materiali. Inoltre, data la sua natura empirica, la formula si presenta in forma logaritmica con la presenza di variabili di regressione C1 e C2 che non sono state riportate numericamente in letteratura. Pertanto è difficile l'uso di tale

formula:

$$\log(T_C) = (C_1 \log w + C_2) \cdot f_{T_{ciclo\ mat}} \cdot f_{T_{ciclo\ geom}} \quad (1.22)$$

$C_1, C_2 =$  variabili regressione ottenute dal grafico  $\frac{\log(\text{tempo di ciclo})}{s \log(\text{peso})}$

$f_{T_{ciclo\ mat}} =$  fattore di regolazione del tempo di ciclo in base al materiale

$f_{T_{ciclo\ geom}} =$  fattore di regolazione del tempo di ciclo in base alla geometria

### 1.2.3.2 Costi di attrezzaggio

Il costo di attrezzaggio dipende dalla complessità del componente da fabbricare in quanto forme complesse potrebbero richiedere lavorazioni aggiuntive.

I costi degli utensili sono descritti dalla seguente equazione:

$$C_{attrezz} = \frac{n_m \cdot e^{(T_1 \log w + T_2)} f_{cost\ attr\ geo}}{L_t} \quad (1.23)$$

dove

$T_1, T_2 =$  variabili di regressione date grafico  $\frac{\log(\text{prezzo utensile})}{s \log(\text{peso})}$

$f_{cost\ attr\ geo} =$  fattore di adeguamento al costo di strumenti in base alla geometria

$n_m =$  numero totale di macchine nella linea di produzione in parallelo

$L_t =$  vita dell'utensile

La vita dell' utensile è regolata sia dal materiale che dalla geometria del componente da fabbricare. Materiali abrasivi e componenti complessi possono ridurre la durata di vita dello stampo.

La vita dell'utensile può essere stimata mediante la seguente equazione:

$$L_T = \frac{e^{\log L_t n} \cdot f_{vita\ mat} \cdot f_{vita\ geo}}{n} \quad (1.24)$$

dove

$L_{tn}$  = vita attesa dello stampo in cicli

( secondo la letteratura la vita attesa è stimata intorno ai 40.000 cicli )

$f_{vita\ mat}$  = fattore adeguamento alla vita dell'utensile in base al materiale

$f_{vita\ geo}$  = fattore adeguamento alla vita dell'utensile in base alla geometria

### 1.2.3.3 Costi di manodopera degli operai

I costi di manodopera comprendono i costi totali della manodopera diretta per ogni componente finito, comprese le prestazioni, ipotizzando che gli operai abbiano un contratto diretto e permanente con la società di produzione:

$$C_{manod} = \frac{T_C \cdot W_{salario} \cdot n_L}{e_p} \quad (1.25)$$

dove

$W_{salario}$  = salario per ogni ora di lavoro diretto

$n_L$  = numero di operai necessari per la produzione di uno componente

$T_C$  = tempo di ciclo medio per fabbricare un componente

$e_p$  = produttività o efficienza del processo di fabbricazione

### 1.2.3.4 Costi di installazione delle macchine

La variabile che viene utilizzata per determinare i costi di installazione totali delle macchine principali comprende i costi totali di installazione, la messa a punto dell'edificio (ad esempio impianti idraulici, elettrici, ecc) e l'installazione di attrezzature ausiliarie.

### 1.2.3.5 Costi di manutenzione delle macchine

I costi totali di manutenzione per le macchine principali comprendono i costi di manutenzione per la macchina stessa, per le principali attrezzature e apparecchiature ausiliarie, oltre al lavoro di manodopera dell'operaio e gli eventuali costi di capitale.

### 1.2.3.6 Costi di costruzione dello spazio

I costi di costruzione dello spazio in pianta per unità di lavoro sono espressi dalla formula:

$$C_{costr} = \frac{A \cdot P_{fabbrica}}{L_{fabbrica}} \quad (1.26)$$

dove

$A$  = area totale occupata dal materiale per la fabbricazione dei prodotti

$P_{fabbrica}$  = prezzo dell'edificio per metro quadro

$L_{fabbrica}$  = ammortamento della vita dell'edificio anni

### 1.2.3.7 Costi di attrezzature accessorie

Tale voce comprende i costi complessivi delle apparecchiature ausiliarie alla macchina principale come ad esempio nastri trasportatori o compressori d'aria che sono comunque necessari per il giusto andamento del processo di produzione (sono esclusi dai costi ausiliari i sistemi di automazione come robot, carrelli elevatori e PLC esterni).

### 1.2.3.8 Costi per spese generali totali

Le spese generali comprendono i costi complessivi sostenuti per il controllo della qualità, le spese di pulizia e i costi gestionali.

### 1.2.3.9 Costi di recupero del capitale

Il recupero del capitale è dato dalla seguente formula:

$$C_{rec\ cap} = \frac{C(-1+(-R)e^L)\log(1+R)}{(1+R)e^{L-1}} \quad (1.27)$$

dove

$R$  = tasso di recupero del capitale o tasso interno di rendimento

$L$  = durata di ripresa degli investimenti

$C$  = costi di capitale definiti come i costi totali combinate di macchina  
cipale, strumenti, capitale circolante mesi edificio, attrezzature ausiliarie

### 1.3 Modello dei costi sviluppato dall'Indian Institute of Technology

Il modello sviluppato dall'Indian Institute of Technology tenta di stimare i costi preventivi consentendo di valutare diverse alternative di progetto per arrivare a quella più economica e, poiché il costo totale dipende dal processo di lavorazione e anche da parametri legati al tempo e alla complessità, il modello del costo deve prendere in considerazione tutti questi aspetti. Per quanto riguarda la stima dei costi preventiva dei getti c'è poca letteratura pubblicata.

Per colmare questa lacuna, è stato sviluppato un modello matematico accompagnato da un database di materiali e fattori di processo con relativi costi a carico degli utenti, cercando di ridurre al minimo i dati in ingresso.

L'obiettivo è quello di consentire ai progettisti di stimare i costi di fusione con precisione, anche con una conoscenza limitata del processo .

L'elaborato si concentra sulla stima dei costi dei componenti con getto in sabbia (sia ferrosi che non ferrosi), che costituiscono oltre il 75% della produzione in fonderia di tutto il mondo, anche se hanno ricevuto finora la minima attenzione da parte dei ricercatori.

In letteratura approcci ed esempi di stima dei costi sono stati fatti per *stampi ad iniezione e dischi per freni* (Cavalieri , 2004). Tuttavia, ben poco è stato riportato sulla stima dei costi per fusioni con colata in sabbia che rappresentano oltre il 75% della produzione di getti.

Gli elementi di costo principali di una colata, come materiali, attrezzature, manodopera, energia e spese generali sono state individuati dai ricercatori Chronister nel 1987 e Jain Kulkarni nel 1988. È attribuibile un peso a tutti i fattori inerenti le spese (materiali, energia, lavoro, ecc). Nella pratica, molte fonderie non sono ancora in grado di stimare i costi base come il peso dei componenti in maniera corretta. Basandosi sui dati attribuibili ai materiali si può calcolare il tasso medio di getti per kg, che viene poi utilizzato per il calcolo del costo dei getti nuovi in base al loro pe-

so. Il metodo ha successo per la produzione di massa in fonderie dove si eseguono principalmente colate di caratteristiche simili, ma non è adatto per tipi di fonderie che hanno una vasta gamma di prodotti. Il costo delle attrezzature è una parte significativa del costo di lancio, specialmente quando le dimensioni dell'ordine sono basse. Tra gli altri fattori, il costo delle attrezzature è legato alla geometria dei prodotti (complessità del prodotto), ai materiali dell'attrezzatura stessa e dalla quantità dell'ordine.

### 1.3.1 Metodologia di stima del costo

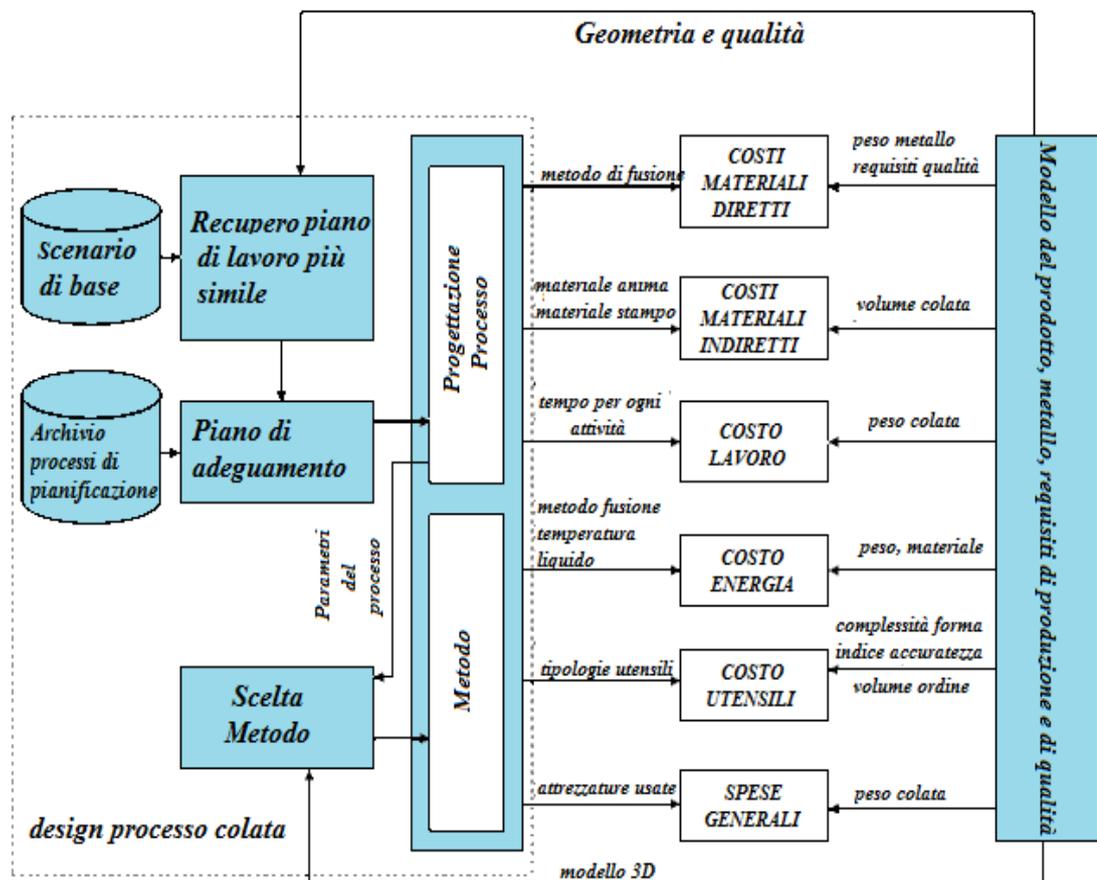


Figura 1.4 - Architettura generale del sistema di stima dei costi

Input dell'utente: comprende solo il modello solido, il materiale di colata, gli attributi di qualità (dimensione massima del vuoto, finitura superficiale, tolleranze dimensionali) e le esigenze di produzione (tasso di produzione, quantità dell'ordine, tempo di campionamento e lead time di produzione).

Il modello è utilizzato per il calcolo automatico delle caratteristiche geometriche, come il volume di colata e il peso, lo spessore minimo, la massima sezione e la complessità della forma.

Il processo di pianificazione si occupa di decisioni relative ai metodi, attrezzature, tempo richiesto, utensili e parametri di tipo e di processo (ad esempio il tipo di sabbia di base, la composizione sabbia, il tipo di fusione, il tempo di raffreddamento e i controlli di qualità).

I principali elementi di costo per un processo di fusione sono materiali, manodopera, energia, attrezzature e spese generali.

Il costo totale di colata è dato dalla somma dei costi relativi al materiale, manodopera, energia, attrezzature e spese generali:

$$C_{Colata} = C_{materiale} + C_{lavoro} + C_{energia} + C_{attrezzature} + C_{spese\ generali} \quad (1.28)$$

#### 1.3.1.1 Costo del materiale

Il costo dei materiali viene diviso in materiali diretti e indiretti:

- I materiali diretti (principalmente metalli o leghe) sono i quelli visibili nel prodotto finale
- I materiali indiretti sono fondamentali per la realizzazione del prodotto, ma non sono inclusi nel prodotto finale (sabbia, nuclei superflui, manicotti, ecc).

La quantità effettiva di metallo consumata è maggiore del peso dei getti prodotti, a causa delle perdite durante la fusione, la colata e la sbavatura (l'equazione dei costi pertanto dovrà includere tali fattori).

Il costo del materiale è dato come la somma dei costi dei materiali diretta e indiretta:

$$C_{materiale} = C_{diretto} + C_{indiretto} \quad (1.29)$$

Il costo diretto in letteratura viene chiamato per semplificare il concetto “costo del metallo”, mentre i costi indiretti corrispondono ai costi dell'anima e della forma.

*Costo materiale diretto*

Il costo del materiale diretto è dato dal prodotto tra il peso del getto e il costo del metallo al chilo con alcuni fattori correttivi che tengono conto delle perdite del metallo nelle varie fasi:

$$C_{diretto} = C_{unità\ materiale} W_{metallo} f_m f_p f_f \quad (1.30)$$

dove

$$C_{unità\ materiale} = \text{costo del metallo in } \frac{\text{€}}{\text{Kg}}$$

$$W_{metallo} = \text{peso del getto} = \rho_c V_{colata}$$

$$\rho_c = \text{densità di colata del metallo}$$

$$V_{colata} = \text{volume del metallo colato}$$

$$f_m = \text{fattore di perdita di metallo in fusione (1,01} \div \text{1,12)}$$

$$f_p = \text{fattore di perdita di metallo in colata (1,01} \div \text{1,07)}$$

$$f_f = \text{fattore di perdita di metallo in smaterozzatura (1,01} \div \text{1,07)}$$

I fattori di perdita sono stati determinati sulla base della letteratura in materia (Beeley 1972):

<i>Forno</i>	fattore di perdita del metallo in fusione	fattore di efficienza del forno
Forno a cupola	1.05-1.12	3.0-3.5
Forno ad induzione	1.01-1.04	1.4-2.0
Forno elettrico ad arco	1.02-1.07	2.0-2.5
Forno a combustione Olio / gas	1.05-1.10	3.25-3.5

*Tabella 1.2 - Fattore di perdita e fattore di efficienza per diversi tipologie di forni*

<i>Metallo/lega</i>	<i>Livello qualità</i>	<i>Massima dimensione del vuoto</i>	<i>Fattore di scarto</i>
ghisa grigia	1	0.01-0.10	1.05-1.10
	2	0.10-1.00	1.02-1.05
	3	1.00-2.00	1.00-1.02
acciaio	1	0.01-0.05	1.07-1.12
	2	0.05-1.00	1.05-1.10
	3	1.00-2.00	1.00-1.05

Tabella 1.3 - Fattore di scarto

### Costo materiale indiretto

I materiali indiretti dipendono dal tipo di processo: la sabbia per la formatura e la formatura stessa costituiscono i costi principali dei materiali indiretti. Il costo di formatura dipende dal tipo di sabbia (silice, olivina, zirconio, silicato di sodio, ecc), composizione (quantità di legante), dimensioni e layout. Vengono considerati inoltre nell'equazione gli scarti dello stampo e dell'anima, gli scarti di fusione e il recupero della sabbia. A seconda dell'uso di manicotti isolanti è aggiunto un addendo che verrà chiamato "materiale misto". Il costo totale sarà dato dalla formula :

$$C_{indiretto} = C_{Stampo\ in\ sabbia} + C_{Anima\ in\ sabbia} + C_{Materiale\ misto} \quad (1.31)$$

$$C_{Stampo\ sabbia} = C_{unità\ stampo} f_{riciclo} f_r f_{scarto\ stampo} \left( \frac{\rho_c V_m}{r_{metallo-sabbia}} - \rho_{anima} V_{anima} \right) \frac{1}{n_c}$$

$$C_{anima\ sabbia} = C_{unità\ anima} f_r f_{scarto\ anima} \rho_{anima} V_{anima}$$

dove

$$C_{stampo\ sabbia} = \text{costo stampo in sabbia}$$

$$C_{anima\ sabbia} = \text{costo anima in sabbia}$$

$$C_{Materiale\ misto} = \text{costo dei vari materiali aggiuntivi}$$

$$C_{unità\ stampo} = \text{costo unità di stampo in sabbia}$$

$$f_{riciclo} = \text{fattore di riciclo della sabbia (0,1 ÷ 1,0)}$$

$f_r$  = fattore di scarto ( da Tabella 2,  $1,00 \div 1,12$ )

$f_{scarto\ stampo}$  = fattore di scarto dello stampo

$f_{scarto\ anima}$  = fattore di scarto dell'anima

$r_{metallo-sabbia}$  = rapporto metallo – sabbia

$V_m$  = volume del metallo per lo stampo =  $(n_c V_{getto}) + V_g + V_f$

$V_f$  = volume di tutti gli alimentatori per ogni stampo

$V_g$  = volume dell'intero sistema di colata

$\rho_{anima}$  = densità dell'anima in sabbia

$V_{anima}$  = volume dell'anima

$n_c$  = numero di cavità per stampo

$V_{box\ formatura}$  = volume box formatura

$$r_{metallo-sabbia} = \rho_{anima} \frac{(n_c V_{getto} + V_f + V_g)}{\rho_{sabbia}} [V_{box\ formatura} - (n_c V_{getto} + V_f + V_g)]$$

### 1.3.1.2 Costo del lavoro

Il costo del lavoro è in funzione delle attrezzature, della manodopera e del tempo richiesto per le varie attività di produzione dei getti.

I tempi delle operazioni di fusione per componente, preparazione sabbia e formatura, vengono calcolati in base al peso di colata, al peso dell'anima , al peso dello stampo e al numero di getti.

Il costo del lavoro sarà dato dalla formula:

$$C_{lavoro} = f_r \left( \sum_{act=1}^n f_{scarto\ operazione} C_{unità\ lavoro} l_{operazione} t_{operazione} \right) \quad (1.32)$$

Dove

$C_{unità\ lavoro}$  = costo unità di lavoro

$l_{operazione}$  = numero di lavoratori coinvolti per ogni operazione  $i$  – esima

$t_{operazione}$  = tempo per ogni operazione  $i$  – esima

$n$  = numero di operazioni

$f_{scarto\ operazione}$  = *fattore scarto per operazioni:*  
 $= f_{scarto\ stampo}$  = *scarto per realizzazione stampi (1.00 ÷ 1.20)*  
 $= f_{scarto\ anima}$  = *scarto per realizzazione anime (1.00 ÷ 1.10)*  
 $= 1$  *per le altre attività*

### 1.3.1.3 Costo dell'energia

La fusione dei metalli è un processo ad alta intensità energetica, e la fusione del metallo costituisce il più importante fattore nel costo energetico. L'energia necessaria per la fusione è stimata utilizzando un'equazione termodinamica, incorporando le relative efficienze, perdite e rendimenti dei forni.

Altre attività ad alta intensità energetica sono la realizzazione degli stampi, la pulizia e la sbavatura. Il costo dell'energia sarà dato dalla somma dei costi di fusione più la voce "altra energia":

$$C_{Energia} = C_{Fusione} + C_{Altra\ energia} \quad (1.33)$$

Il costo di fusione è data dalla seguente formula:

$$C_{Fusione} = C_{Costo\ unit\ ener} \cdot f_n \cdot W_{getto} \cdot f_m \cdot f_y \cdot f_p \cdot f_f \cdot [c_{ps}(t_{fusione} - t_{ambiente}) + L + c_{pl}(t_{colata} - t_{fusione})] \quad (1.34)$$

*Dove*

$C_{costo\ uni\ ener}$  = *costo unitario dell'energia in  $\frac{\text{€}}{\text{J}}$*

$f_n$  = *fattore di efficienza del forno (tabella 1)*

$W_{getto}$  = *peso del getto in Kg*

$f_m$  = *fattore di perdita di metallo in fusione (1,01 ÷ 1,12)*

$f_y$  = fattore di resa complessiva ( refrattario + condotto di colata )

$f_p$  = fattore di perdita di metallo in colata (1,01 ÷ 1,07)

$f_f$  = fattore di perdita di metallo in sbavatura (1,01 ÷ 1,07)

$C_{ps}$  = calore specifico del metallo in fase solida  $\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$

$t_{fusione}$  = temperatura di fusione in  $^\circ C$

$t_{ambiente}$  = temperatura ambiente in  $^\circ C$

$C_{pl}$  = calore specifico del metallo in fase liquida in  $^\circ C$

$L$  = calore latente di fusione del metallo  $\frac{J}{kg}$

$t_{colata}$  = temperatura colata o temperatura rubinetto in  $^\circ C$

$f_y$  = fattore di resa complessiva

$$f_y = 1 + \frac{w_f + w_g}{n_c + W_{getto}} \quad (1.35)$$

dove

$w_f$  = peso di tutti gli alimentatori di ogni stampo

$w_g$  = peso dell'intero sistema di condotto di colata

Il costo dell'altra energia viene assegnato in base al peso del getto. Il tasso di assegnazione è calcolato dividendo i costi energetici per un periodo di tempo per il peso totale dei getti realizzati nel corso di tale periodo.

#### 1.3.1.4 Costo di lavorazione delle attrezzature

I costi di lavorazione delle attrezzature sono i costi per la realizzazione di stampi (se in conchiglia), modelli e placche modello e casse d'anima. Sono quindi costi fissi che non dipendono dal processo fusorio in quanto si sostengono all'avvio e vengono ammortizzati durante la produzione e sono costi che la fonderia sostiene pagando direttamente una modelleria che realizza le attrezzature di colata.

Il costo delle attrezzature è difficile da stimare, in quanto il prodotto in fase di progettazione non è ancora sviluppato e non si è delineato in maniera dettagliata il piano di lavoro. Per tale stima è auspicabile una metodologia parametrica guidata da parametri relativi alla geometria del prodotto, al materiale, e alla qualità e quantità dell'ordine.

La metodologia può dare risultati abbastanza precisi con dati relativi ai costi del passato utilizzati per derivare le equazioni parametriche.

I principali fattori che influenzano il costo di attrezzaggio sono stati identificati nel materiale degli utensili, nelle dimensioni, nell'accuratezza e nella complessità della forma.

Il materiale degli utensili (legno, alluminio, ghisa, acciaio, ecc) è di solito selezionato in base alla quantità dell'ordine.

L'equazione dà il costo relativo di attrezzaggio di forme diverse, ma dello stesso materiale. Questo viene moltiplicato per un indice di costo per dare il costo effettivo, tenendo conto variazioni tra produttori e paesi (valuta), e diviso per l'ordine quantità per ottenere il costo ammortizzato di utensili (per fusione). L'indice di costo utilizzato nella presente formulazione è pari a 1000 (per la valuta in INR).

La complessità della forma di un componente è di solito descritta in termini qualitativi come bassa, media, alta e molto elevata. Elementi geometrici con caratteristiche interne come fori e tasche, e caratteristiche esterne come protuberanze e variazione di spessore della parete risultato di complessità di forma maggiore.

Un'elevata complessità della forma influisce sulla qualità e produttività del prodotto, con costi maggiori di attrezzaggio, materiali, processi, e spese generali.

Il costo delle attrezzature può essere un buon indicatore della complessità forma, ma richiede una stima abbastanza precisa in una fase iniziale del ciclo di vita del prodotto. Questo non è facile, poiché dipende dal processo di pianificazione dettagliata della fabbricazione di utensili e ai costi globali, che sono non realizzabile nelle prime fasi di progettazione del prodotto.

Il costo di attrezzaggio degli utensili sarà dato dalla formula:

$$C_{attrezzature} = e^{(0.629V_{getto}+0.048C_{ac}+0.023C_s+0.739)} \quad (1.36)$$

*Dove*

$C_{attrezzaggio\ utensile}$  = costo di attrezzaggio per utensili in ghisa

$V_{getto}$  = volume getto in  $m^3$

$C_{ac}$  = indice precisione o accuratezza ( scala 1 ÷ 100)

$C_s$  = complessità forma del getto

Tale equazione fornisce il costo relativo di utensili di forme diverse, ma per lo stesso materiale. Dividendo per la quantità dell'ordine si può ottenere il costo ammortizzato degli utensili (per fusione):

$$C_{utensile} = \frac{C_{indice} C_{attrezzature}}{Q} \quad (1.37)$$

*dove*

$C_{indice}$  = indice che tiene conto di variazioni del produttore, valuta e tempo

$Q$  = quantità dell'ordine

I dati dei costi successivi hanno come valuta la Rupia Indiana, ai fini operativi è stato applicato in seguito il cambio valuta per trovare una stima media in Euro. Il cambio valuta attuale è:  $1\text{ Rupia} = 0,0136\text{ Euro}$

Per un dato materiale di utensili (in questo caso, ghisa), l'equazione del costo è stato sviluppata attraverso l'analisi di regressione utilizzando i dati raccolti:

<i>Componente</i>	Volume getto ( $dm^3$ ) $V_{getto}$	Indice accuratezza $C_{ac}$	Complessità forma $C_s$
Cubo	1.00	5	6.0
Sfera	1.20	10	10.0
Cubo con foro	1.50	20	12.0
Supporto	0.93	25	25.0
Puleggia	4.80	30	20.0
Aletta	0.10	40	27.5
Giuntura	0.10	40	48.0
Valvola a sfera	0.98	50	32.5
Involucro differenziale	0.56	40	55.0
Auto cilindro	0.61	50	42.0
Valvola a globo	10.10	80	35.0
Sollevatore idr	40.10	80	80.0
Blocco motore	46.94	90	92.0

*Tabella 1.4 - Dati complessità per utensili in ghisa formulati per regressione*

La determinazione della complessità dell' oggetto è sicuramente la fase più delicata e importante per il giusto ottenimento di una stima appropriata. In aiuto per tali difficoltà è stato analizzato il metodo CBR (Case based reasoning) . Il metodo CBR è un metodo di ragionamento analogico, che usa in parte problemi già risolti o esperienze passate per problemi attuali irrisolti. I passaggi logici di tale metodo sono sintetizzabili in 3 punti:

1. Memorizzare casi precedenti come casi base
2. Recupero di un caso analogo precedente basato su una serie di caratteristiche del prodotto
3. Adeguamento della soluzione (piano di lavoro) di un caso precedente al nuovo caso

La metodologia CBR è diventata popolare negli ultimi anni, a causa di una serie di vantaggi in gioco, come trovare le soluzioni a problemi complessi in modo rapido. Il successo di un sistema CBR dipende dalla sua capacità di recuperare il caso più pertinente a sostegno della soluzione di un nuovo caso. L' algoritmo di recupero del caso più vicino funziona specificando i valori e i pesi degli attributi:

$$sim(T, S) = \sum_{i=1}^n f(T_i, S_i) w_i$$

$f$  = funzione per determinare distanza tra gli attributi dei casi target e caso sorgente

$n$  = numero attributi in ogni caso

$i$  = attributo individuale

$w$  = peso dell'attributo

Il metodo comprende le seguenti fasi, illustrate in figura:

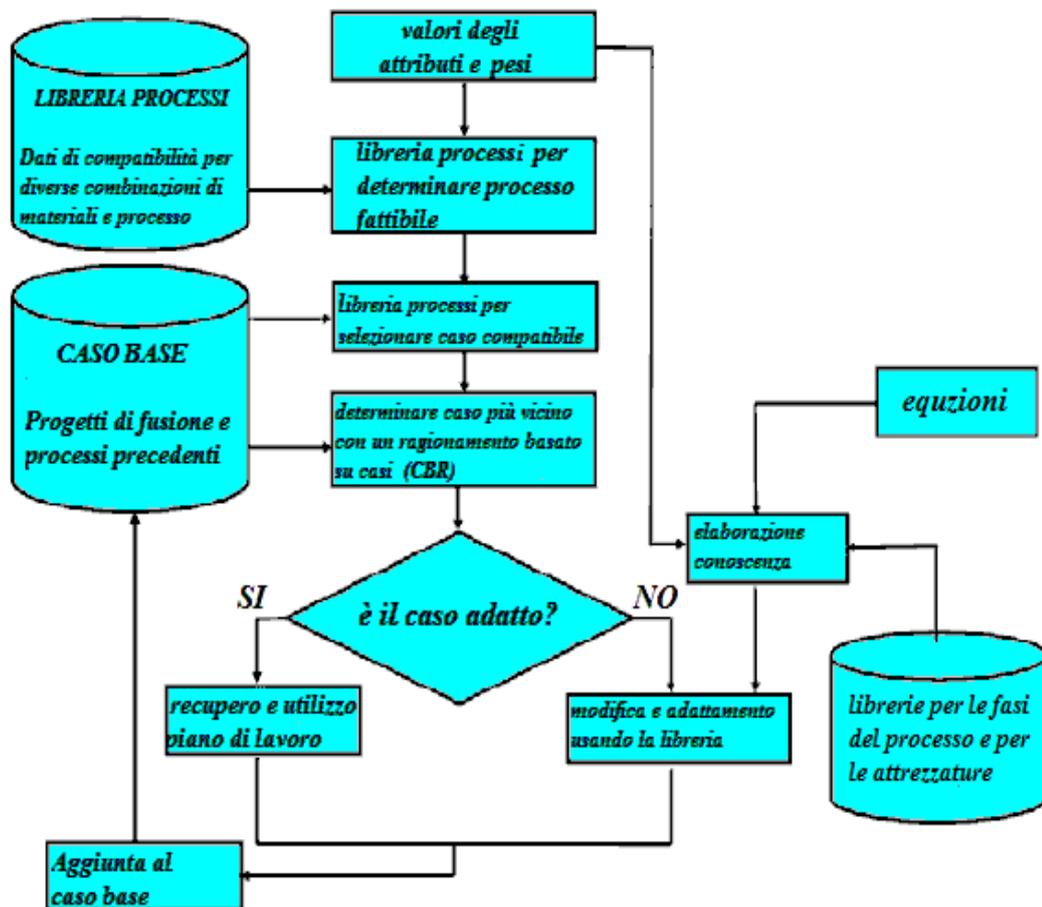


Figura 1.6 - Metodologia per la pianificazione del processo fusorio

- Identificare degli attributi di un getto per il recupero caso
- Determinazione dei pesi degli attributi utilizzando processo analitico
- Specifica dei valori degli attributi
- Recupero di uno o più casi simili dal caso base
- Adattamento del caso selezionato per gestire il nuovo problema e successiva conservazione del caso adattato per un uso futuro.

Sono stati identificati quindici attributi dei getti per il processo di pianificazione di fusione:

- |                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1. materiale di colata            | 8. complessità forma             |
| 2. dimensioni massime del getto   | 9. tolleranze dimensionali       |
| 3. peso del getto                 | 10. finitura superficiale        |
| 4. spessore massimo della sezione | 11. dimensioni massime del vuoto |
| 5. spessore minimo della sezione  | 12. quantità dell'ordine         |
| 6. dimensioni minime dell'anima   | 13. tasso di produzione          |
| 7. dimensioni massime dell'anima  | 14. lead time di campionamento   |
|                                   | 15. lead time di produzione      |

Per calcolare i pesi degli attributi, è stato impiegato il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process). Questa metodologia AHP comporta lo sviluppo di una struttura gerarchica del problema decisionale attraverso l'uso di attributi che verranno confrontati a coppie, verificando la coerenza dei confronti, e calcolando i pesi in base alle priorità relative.

Tutti gli attributi (ad eccezione di fusione materiale) sono strutturati in una forma gerarchica come attributi geometrici, attributi di qualità e attributi di produzione:

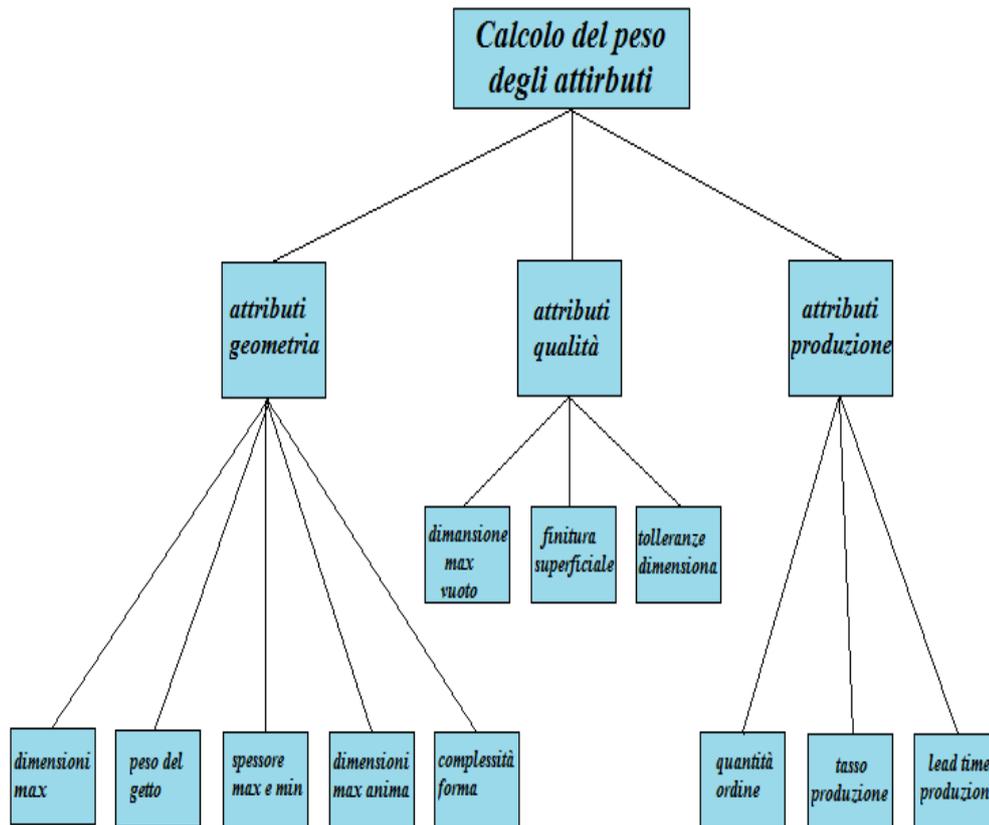


Figura 1.7 - Gerarchia AHP per determinare i pesi degli attributi

Lo scopo dei pesi degli attributi è quello di esprimere l'importanza di ogni attributo rispetto agli altri nel recupero del caso più appropriato.

Il metodo AHP prevede la costruzione di una matrice quadrata in cui sono confrontati l'insieme di attributi a coppie e pesi  $w_1, w_2, \dots, w_n$  associato a ciascun attributo sono calcolati media geometrica. La somma dei pesi dei singoli attributi di un particolare gruppo è normalizzata a uno. Il peso complessivo di un attributo particolare è uguale al prodotto del proprio peso e il peso del gruppo di attributi di appartenenza.

La complessità della forma, che svolge un ruolo importante nel processo di pianificazione, è difficile da esprimere numericamente. In realtà, sembra che vi sia una definizione quantificabile per la complessità della forma nella letteratura tecnica. La complessità è espressa su una scala da 0 a 100 in cui i valori più bassi sono forme semplici, mentre valori più alti rappresentano forme complesse. Ovviamente per ot-

tenere tale stima si parte dall'analisi del modello 3D del getto. A questo scopo, un'equazione per calcolare la complessità della forma in termini di superficie e numero di anime è stato sviluppato utilizzando l'analisi di regressione.

L'equazione proposta è la seguente:

$$C_s = \alpha_0 + \alpha_1 C_a + \alpha_2 C_c \quad (1.38)$$

dove

$C_s$  = indice complessità

$\alpha_i$  = coefficienti di regressione

$$C_a = \text{rapporto area} = 100 \left( 1 - \left( \frac{\text{superficie di un cubo di volume uguale}}{\text{superficie del solido}} \right) \right)$$

$$C_c = \text{fattore complessità anima} = 100 \left[ 1 - \left( \frac{1}{\sqrt{1+n}} \right) \right]$$

$n$  = numero di anime

La procedura è stata adattata successivamente per lo sviluppo di una equazione percorrendo queste fasi:

1. Selezione di un insieme di componenti con forme semplice e complesse
2. Per ciascun componente è stata determinata la complessità relativa della forma tramite confronto con metodo AHP
3. Il valore del rapporto superficie ( $C_a$ ) per ogni componente è stato determinato dal modello solido. Il fattore di complessità nucleo ( $C_c$ ) è stato determinato in base al numero di anime.
4. Dai valori sopra, l'equazione per la complessità della forma è stata sviluppata come:

$$C_s = 0.3C_a + 0.8C_c - 14 \quad (1.39)$$

In questo modo la formula della complessità della forma è stata espressa semplicemente in termini di rapporto di area.

L'indice di accuratezza è stato assegnato con una scala da 1 a 100 scala a seconda dell'applicazione. Per getti come ad esempio blocchi motore e valvole si richiede un di indice di accuratezza alto, mentre per getti come staffe si richiede un valore più basso.

Per determinare la complessità della forma per un nuovo componente, i valori di  $C_a$  e  $C_c$  sono determinati usando il modello 3D e poi per il calcolo della complessità viene usata l'equazione appena descritta.

<i>Componente</i>	Volume $dm^3$	Superficie $dm^2$	Superficie cubo con lo stesso volume $dm^2$	Rapporto area $C_a$	Num anime	Fattore complex anime $C_c$	Calcolo complex forma $C_s$
Cubo	1	6	6	0	0	0	<b>0</b>
Piastra	0,2	4,6	2,05	55.39	0	0	<b>3.0</b>
Cubo con buco	0,36	7,28	3,03	58.29	1	29.29	<b>27.0</b>
Sfera	0,52	12,56	3,89	44.00	0	0	<b>0</b>

Tabella 1.5 - Complessità forma componenti semplici

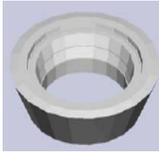
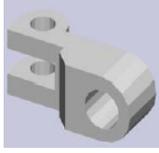
<i>Componente</i>	Volume $dm^3$	Superficie $dm^2$	Superficie cubo con lo stesso volume $dm^2$	Rapporto area $C_a$	Num anime	Fattore complex anime $C_c$	Calcolo complex forma $C_s$
	646,32	1074,7	4485,2	58.27	1	29.29	<b>27.0</b>
	0,32	4,5	2,82	37.51	3	50.00	<b>37.0</b>
	0,55	17,2	4,07	76.44	2	42.26	<b>43.0</b>
	38,04	243,1	67,87	72.07	10	69.8	<b>64.0</b>

Tabella 1.6 - Complessità delle forme

Riguardo alla complessità della forma e ai costi delle attrezzature la letteratura propone un altro modello più dettagliato che definisce il fattore in base a sei parametri geometrici che comprendono il numero di numero delle anime, il rapporto di volume e di superficie, il volume di delle anime, lo spessore della sezione e la draw distance. Tali coefficienti vengono calcolati per regressione partendo dalla complessità reale della forma, e definendoli come costi aggiuntivi rispetto alle attrezzature di una forma semplice come un cubo. La regressione è stata effettuata utilizzando i modelli CAD di quaranta getti industriali di varie forme.

I parametri geometrici sono impostati per avere un valore compreso tra 0 e 1, dove i valori più alti indicano una maggiore complessità.

Di seguito analizzeremo singolarmente tutti i sei parametri:

1. *Rapporto del volume del pezzo*  $C_{PR}$

è dato dal rapporto tra il volume del pezzo e il volume del riquadro di delimitazione. Il riquadro è dato dalla lunghezza, larghezza e altezza massime della geometria del pezzo. Quando il volume del pezzo è simile al suo rettangolo di selezione, è necessaria una minore rimozione del materiale, con una conseguente riduzione dei costi di lavorazione. Al contrario, una maggiore differenza tra i volumi comporta un elevato costo di produzione. Questo criterio è definito come:

$$C_{PR} = 1 - \frac{V_p}{V_b} \quad (1.40)$$

dove

$V_p = \text{volume del pezzo}$

$V_b = \text{volume del rettangolo di selezione}$

2. *Rapporto dell'area*  $C_{AR}$

$C_{AR}$  è il rapporto tra la superficie di una sfera equivalente (con lo stesso volume del pezzo) e la superficie del pezzo. Questo rapporto si basa sul fatto che la sfera ha superficie minima rispetto a qualsiasi altra geometria. Più alto sarà il rapporto e più alto sarà il costo. Questo criterio è definito come:

$$C_{AR} = 1 - \frac{A_S}{A_p} \quad (1.41)$$

dove

$A_p$  = superficie del pezzo

$V_p$  = volume del pezzo

$A_S$  =

area della superficie della sfera immaginaria con un volume uguale al pezzo

$$A_S = \sqrt[3]{(4\pi)} \cdot \sqrt[3]{(3V_p)^2}$$

### 3. Numero di anime $C_{NC}$

Le anime sono degli oggetti che servono per ottenere dei fori nella fusione, cioè delle parti che non devono venir riempite dal metallo liquido. Tali cavità sono realizzabili facilmente nel caso di un rapporto tra diametro e lunghezza del foro non eccessivamente basso, pena la rottura dell'anima durante la colata.

Più alto sarà il numero di anime, più alto sarà il costo di attrezzaggio. Il criterio del numero di anime è definito come segue, considerando che il tasso di aumento della complessità della forma aumenta con il numero di anime:

$$C_{NC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(1+N_C)}} \quad (1.42)$$

dove

$N_C$  = numero di anime

### 4. Rapporto del volume dell'anima $C_{CR}$

Più grandi sono le anime e più grandi saranno i costi di attrezzaggio. Quindi il rapporto tra il volume dell'anima e il volume del riquadro di delimitazione è incluso come un'altra misura di complessità :

$$C_{CR} = \frac{\sum_i V_{c_i}}{V_b} \quad (1.43)$$

dove

$V_{c_i}$  = volume dell'anima  $i$  – esima

$V_b$  = volume del rettangolo di selezione

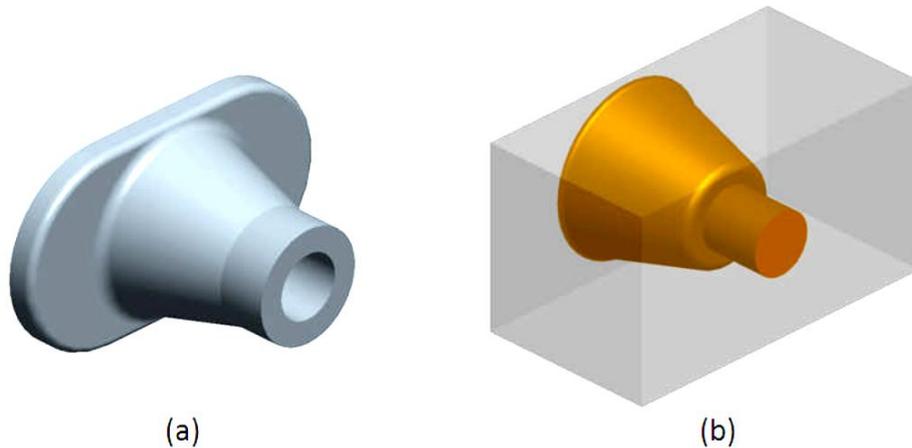


Figura 1.8 - (a) pezzo , (b) anima e volume di delimitazione

5. Rapporto di spessore  $C_{TR}$

$C_{TR}$  è il rapporto di spessore minimo e massimo della parte. Le sezioni sottili sono più difficili da lavorare rispetto a una sezione spessa. Questo criterio è definito come:

$$C_{TR} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (1.44)$$

dove

$T_{min}$  = spessore minimo del pezzo

$T_{max}$  = spessore massimo del pezzo

6. Rapporto di profondità  $C_{DR}$

La draw distance, che è la profondità massima degli utensili, influisce sui tempi di produzione e quindi sul costo. L'effettiva draw distance viene confrontata con la minima draw distance possibile, che è la metà della dimensione minima della parte. Il criterio è progettato in modo che parti con

rapporto di profondità superiore indichino maggiore complessità.

$$C_{DR} = 1 - \frac{0,5(\min(L,M,H))}{D_d} \quad (1.45)$$

dove

$L$  = lunghezza del pezzo

$W$  = larghezza del pezzo

$H$  = altezza del pezzo

$D_d$  = draw distance degli utensili

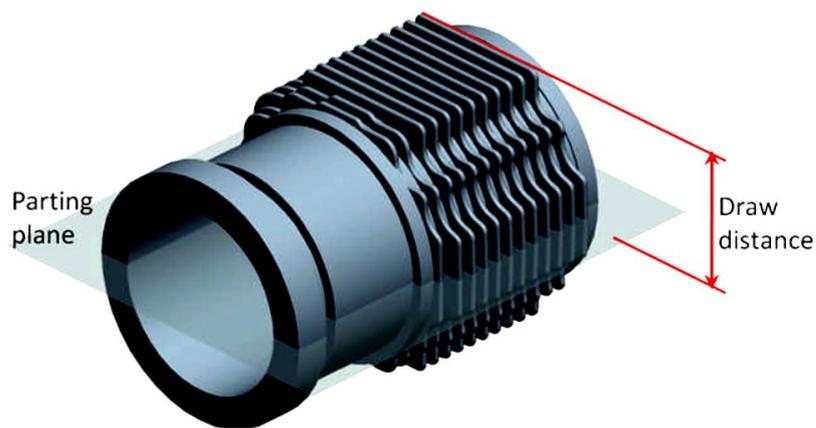


Figura 1.9 - Draw distance rispetto al piano di divisione

Il fattore di complessità della forma complessiva può essere stimato dalla somma ponderata dei singoli criteri sopra descritti:

$$CF_{stimata} = w_0 + w_1 C_{PR} + w_2 C_{AR} + w_3 C_{NC} + w_4 C_{CR} + w_5 C_{TR} + w_6 C_{DR} \quad (1.46)$$

Il costo di attrezzaggio è solitamente maggiore per parti con maggiore complessità. Per lavorazioni di una forma semplice, come un cubo, l'attrezzaggio e le lavorazioni con macchinari tradizionali sono a basso costo. Se lo stesso volume deve essere rimosso per una forma complessa, può richiedere lavorazioni con macchine a controllo numerico con frese multiple, portando ad un costo molto elevato.

In realtà, la complessità della forma non è l'unico fattore di costo che guida l'attrezzaggio degli utensili. Altri fattori sono il materiale degli utensili e le esigenze di precisione. La complessità forma di un pezzo può essere valutata in termini di costi aggiuntivi sostenuti per la fabbricazione dei suoi utensili, rispetto al costo di lavorazione di una forma semplice come un cubo.

Il costo aggiuntivo causa della complessità della forma è dato dalla differenza del costo di attrezzaggio di un cubo di 'volume differenziale'. Il volume differenziale, che rappresenta il volume da lavorare, è ottenuto sottraendo il volume pezzo dal suo volume di delimitazione.

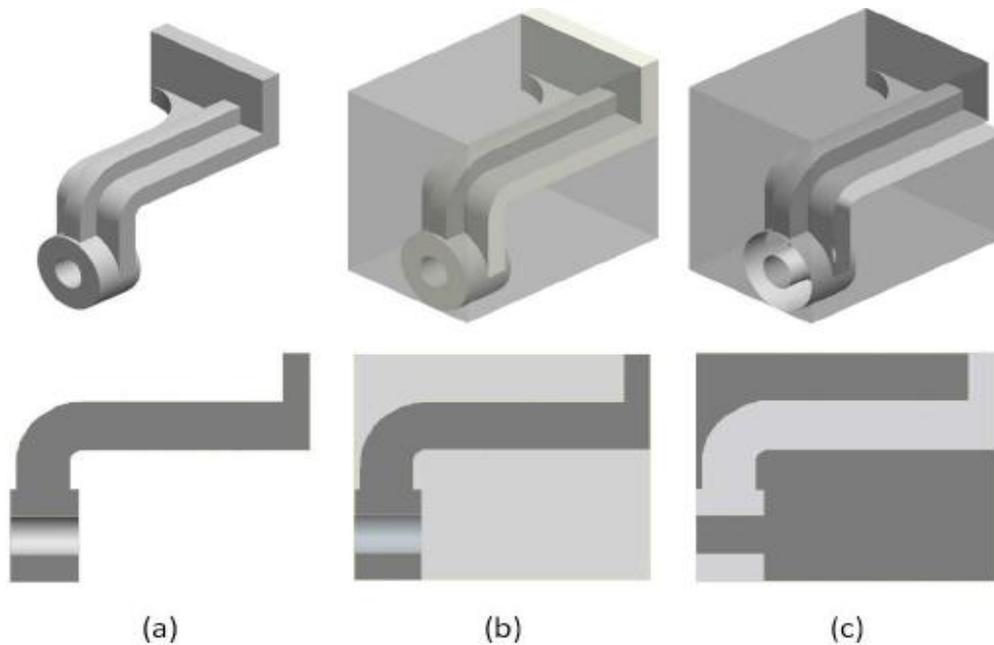


Figura 1.10 - (a) pezzo, (b) rettangolo di delimitazione, (c) volume differenziale

Definiamo  $CF_{effettiva}$  (fattore effettivo della complessità della forma) come rapporto tra costo aggiuntivo di lavorazione  $C_a$  (a causa della complessità della forma) e costi di lavorazione di un cubo di volume differenziale  $C_d$ . Il costo aggiuntivo di lavorazione  $C_a$  è dato dalla differenza di costo effettivo lavorazione dell'utensile  $C_t$  e  $C_d$  :

$$CF_{effettiva} = \frac{C_a}{C_d} = \frac{C_t - C_d}{C_d} = \frac{C_t}{C_d} - 1 \quad (1.47)$$

La metodologia proposta per sviluppare e poi convalidare il fattore di complessità della forma ha seguito quattro fasi :

1. *Acquisizione dati corrispondenti alla geometria*

In letteratura sono stati calcolati per 40 casi di riferimento. La lunghezza, la larghezza e l'altezza del pezzo vengono misurate dal modello CAD, e utilizzate per calcolare il volume del riquadro di delimitazione.

<i>Parametri</i>	<i>Componente 1</i>	<i>Componente 2</i>
$L =$ lunghezza del pezzo	240	375
$W =$ larghezza del pezzo	100	270
$H =$ altezza del pezzo	120	282
$V_b =$ volume rett. selezione	2880000	28552500
$V_p =$ volume del pezzo	1089563	6361078
$C_{PR} = 1 - \frac{V_p}{V_b}$ rapporto volume	0,62	0,78
$A_p =$ superficie del pezzo	111352,3	719652,9
$A_s =$ area superficie della sfera	51170,1	165888,9
$C_{AR} = 1 - \frac{A_s}{A_p}$ Rapporto dell' area	0,54	0,77
$N_C =$ numero di anime	2	1
$C_{NC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(1+N_C)}}$ criterio num° anime	0,42	0,29
$V_{C_i} =$ totale volume dell'anima	582363,4	10039504,0
$C_{CR} = \frac{\sum_i V_{C_i}}{V_b}$ rapporto volume anima	0,20	0,35
$T_{min} =$ spessore min del pezzo	30	22
$T_{max} =$ spessore max del pezzo	120	270
$C_{TR} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$ rapporto spessore	0,75	0,92
$D_d =$ draw distance	50	135
minimo di $L, W, H$	100	270
$C_{DR} = 1 - \frac{0,5(\min(L,M,H))}{D_d}$ rap. profondità	0,00	0,00
$CF_{stimata}$	47,29	52,54

Tabella 1.7 - Calcolo dei parametri geometrici e dei criteri per due componenti

2. *Calcolo  $CF_{effettiva}$  per ogni caso di riferimento:*

$$CF_{effettiva} = \frac{C_a}{C_d} = \frac{C_t - C_d}{C_d} = \frac{C_t}{C_d} - 1 \quad (1.48)$$

Il fattore di complessità effettivo è calcolato come il rapporto tra il costo aggiuntivo di lavorazione e il costo della lavorazione del cubo stesso volume. Tale fattore è stato calcolato per tutte le 40 parti.

3. *Calcolo sei criteri per ciascun caso di riferimento:*

$$C_{PR}, C_{AR}, C_{NC}, C_{CR}, C_{TR}, C_{DR}$$

4. *Stima tramite regressione dei pesi del fattore di complessità*

La regressione è effettuata utilizzando un software di analisi statistica e serve per calcolare i pesi  $w_0 \div w_6$  dell'equazione:

$$CF_{stimata} = w_0 + w_1 C_{PR} + w_2 C_{AR} + w_3 C_{NC} + w_4 C_{CR} + w_5 C_{TR} + w_6 C_{DR}$$

L'equazione della complessità della forma diventa:

$$CF_{stimata} = 5,7 + 10,8C_{PR} + 18,0C_{AR} + 32,7C_{NC} + 29,0C_{CR} + 6,9C_{TR} + 0,7C_{DR} \quad (1.49)$$

5. *Convalida  $CF_{stimata}$  comparando i risultati a  $CF_{effettiva}$*

Per convalidare l'equazione della complessità della forma  $CF_{stimata}$ , viene testato su 3 pezzi diversi da quelli utilizzati nella regressione. Per ogni pezzo vengono calcolati i sei criteri ( grazie ai modelli CAD di ognuno) e poi, utilizzando i pesi trovati, viene calcolato  $CF_{stimata}$ . Dopodiché viene calcolato  $CF_{effettiva}$  e poi comparati i due risultati per valutarne lo scarto e la percentuale di errore.

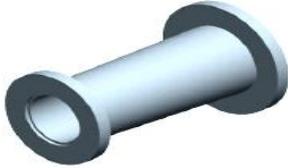
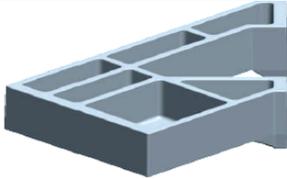
<i>Componente</i>	$C_{PR}$	$C_{AR}$	$C_{NC}$	$C_{CR}$	$C_{TR}$	$C_{DR}$	$CF_{stimata}$
	0,85	0,75	0,29	0,17	0,66	0,00	47,35
	0,79	0,78	0,00	0,00	0,98	0,31	35,25
	0,90	0,82	0,00	0,00	0,97	0,50	37,22

Tabella 1.8 - Calcolo  $CF_{stimata}$

Il fattore di complessità della forma stimata viene confrontato con il fattore effettivo (ottenuto dalla società utensili sulla base dei loro dati di costo reali) e vengono comparati i risultati :

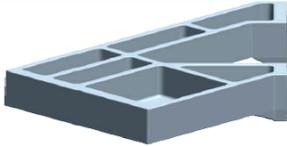
<i>Componente</i>	$CF_{effettiva}$	$CF_{stimata}$	% errore
	48,12	47,35	1,61
	36,08	35,25	2,30
	38,02	37,22	2,10

Tabella 1.9 - Calcolo margine d'errore di  $CF_{stimata}$  rispetto a  $CF_{effettiva}$

Si osserva che anche la deviazione massima (2,30%) è ben entro i limiti accettabili in generale del 5%. Questo stabilisce la validità utilizzando la complessità equazione stimata per una vasta gamma di pezzi fusi.

### 1.3.1.5 Costo di spese generali

Le spese generali comprendono le spese amministrative e i costi di ammortamento. Tali costi sono assegnati in base al peso del getto, come indicato di seguito:

$$C_{spese\ generali} = C_{gestione} + C_{ammortamento} \quad (1.50)$$

$$C_{gestione} = w_{getto} C_{tasso\ gestione}$$

$$C_{ammortamento} = w_{getto} C_{tasso\ ammortamento}$$

Dove

$$C_{gestione} = \text{costi di gestione del componente}$$

$$C_{ammortamento} = \text{costi di ammortamento per componente}$$

$$C_{tasso\ gestione} = \text{costi di gestione al Kg}$$

$$C_{tasso\ ammortamento} = \text{costi di ammortamento al Kg}$$

$$w_{getto} = \text{peso del getto Kg}$$

I tassi di gestione e ammortamento sono calcolati dividendo il corrispondente costo nel periodo di tempo per il peso totale dei pezzi fabbricati durante tale intervallo.

## Capitolo 2 Elaborazione del modello per la stima dei costi

Il modello da noi sviluppato parte sostanzialmente dal modello (1.28) dell'Indian Institute of Technology con variazioni sostanziali riguardo ai fattori di perdita, stima dei tempi di realizzazione per il calcolo del costo della manodopera, applicazione del coefficiente di complessità per il costo delle attrezzature e ulteriori costi inerenti la finitura del getto. La determinazione dei costi della fusione in sabbia è una procedura non facile in quanto ci sono un numero elevato di variabili di processo. La procedura di stima dei costi verrà suddivisa in sei macro-categorie: costo del materiale, costo della manodopera, costi energetici, costi delle attrezzature e costi di finitura.

I costi di manutenzione per la macchine e la manodopera dell'operaio di manutenzione e i costi complessivi sostenuti per il controllo della qualità, le spese di pulizia dello stabilimento e i costi gestionali non vengono inseriti nel modello da noi sviluppato poiché tali voci sono costi indiretti e quindi difficili da stimare in un modello di preventivazione dove non si conosce la produzione annua del getto.

Il modello assume tale forma:

$$C_{colata} = C_{materiali} + C_{manodopera} + C_{energia} + C_{attrezzature} + C_{finitura} \quad (2.1)$$

Andremo nel dettaglio ad analizzare ogni macro-addendo di tale formula specificando gli input necessari e le variabili di ognuno .

### 2.1 Costo dei materiali

Il componente  $C_{materiale}$  stima i costi di tutti i materiali diretti ,ovvero visibili nel pezzo finale, e indiretti come la sabbia per la realizzazione di stampo, anime e, se utilizzato, il costo di materiale isolante o manicotti isolanti.

$$C_{materiali} = C_{lega\ metallica} + C_{stampo} + C_{anima} + C_{materiale\ isolante} \quad (2.2)$$

Proseguiremo nel dettaglio per ogni addendo dell'equazione.

### 2.1.1 Costo della lega metallica

Tale voce tiene conto del costo diretto della lega metallica del pezzo calcolato in funzione delle percentuali dei vari componenti della lega, il peso del pezzo e il fattore di perdita di metallo nella fusione. Per il calcolo del peso del getto, conoscendo la geometria del pezzo, in particolare il volume, è facilmente calcolabile moltiplicando il volume del pezzo per la densità della lega (reperibile in letteratura e su numerosi software di simulazione).

Il costo della lega metallica è data dalla seguente formula:

$$C_{lega\ metallica} = (\%_{comp\ A} C_{comp\ A\ unit\grave{a}} + \%_{comp\ B} C_{comp\ B\ unit\grave{a}}) \rho_{metallo} V_{getto} f_p \quad (2.3)$$

dove

$\%_{comp\ A,B}$  = percentuali componenti della lega

$C_{comp\ A,B\ unit\grave{a}}$  = costo unitario dei vari componenti della lega in  $\frac{\text{€}}{\text{Kg}}$

$\rho_{metallo}$  = densità della lega

$V_{getto}$  = volume del getto

$\rho_{metallo} V_{getto}$  = peso del getto

$f_p$  = fattore di perdita di metallo in base alla tipologia di forno usato

I fattori di perdita del metallo in base alla tipologia del forno sono riportati nella tabella seguente:

<i>Tipologia Forno</i>	Capacità tipica ( tonnellate )	Lega usata	Perdita metallo
<i>Crogiolo (Gas)</i>	0,07-100	Alluminio	4-6%
		Magnesio	4-6%
		Rame	2-3%
<i>Cupola</i>	0,05-20 per ora	Ferro	3-12%
<i>Arco diretto *</i>	1,5 -100	Acciaio	5-8%
<i>A immersione</i>	0,7 per ora	Zinco	N/A
<i>A induzione *</i>	0,01-50	Alluminio	0.75-1.25%
		Rame	2-3%
		Magnesio	2-3%
		Ferro	1-2%
		Acciaio	2-3%
<i>A riverbero</i>	<i>Elettrico *</i>	0.5 - 125 Alluminio	1-2%
		Zinco	2-3%
	<i>Gas</i>	0.5 - 125 Alluminio	3-5%
		Zinco	4-7%

Tabella 2.2 - Efficienze e perdite di metallo per i diversi forni

\* Le efficienze energetiche di questi forni sono molto più basse (circa un terzo) rispetto alle altre dovute a perdite elettriche nella generazione e trasmissione dell'energia.

Per quanto riguarda la densità dei metalli e delle leghe sono riportati i valori nella tabella seguente:

<i>Metallo o lega</i>	Densità $\left(\frac{kg}{dm^3}\right)$	<i>Metallo o lega</i>	Densità $\left(\frac{kg}{dm^3}\right)$
<i>acciaio comune</i>	7.8 - 7.9	<i>mercurio</i>	13.6
<i>acciaio inox</i>	7.48 - 8	<i>metallo antifrizione</i>	9.3 - 10.6
<i>acciaio laminato</i>	7.85	<i>metallo bianco</i>	7.1
<i>A13 (Alluminio)</i>	2.66	<i>metallo delta</i>	8.6
<i>A360 (Alluminio)</i>	2.74	<i>molibdeno</i>	10.2
<i>AZ91B (magnesio)</i>	1.8	<i>Manganese-bronzo865</i>	8.3
<i>argentana</i>	8.4 - 8.9	<i>nicel</i>	8.8
<i>argento</i>	10.49	<i>oro</i>	19.25
<i>berillio</i>	1.84	<i>ottone in getti</i>	8.4 - 8.7
<i>bronzo (8-14% stagno)</i>	7.4 - 8.9	<i>ottone laminato e</i>	8.43 - 8.73
<i>bronzo fosforoso</i>	8.78 - 8.92	<i>piombo</i>	11.34
<i>bronzo al piombo</i>	8.8 - 9.5	<i>rame</i>	8.93
<i>ferro</i>	7.85	<i>ZA8 (zinco-Al)</i>	6.3
<i>ghisa</i>	6.8 - 7.8	<i>stagno</i>	7.28
<i>leghe leggere a base Al</i>	2.56 - 2.8	<i>zamak (zinco)</i>	6.6

Tabella 2.3 - Densità metalli o leghe

### 2.1.2 Costo del materiale per la formatura

Il costo del materiale per la formatura  $C_{Stampo}$  dipende dal tipo di sabbia (silice, olivina, zirconio, silicato di sodio, ecc), dalla composizione di quest'ultima (considerando la quantità di legante) e dalla geometria. 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 della letteratura americana per vari tipi di getti è stato approssimato il costo della sabbia intorno ai  $0.018 \frac{\$}{Kg}$  di metallo colato. Per i calcoli successivi terremo conto anche di altre fonte per stimare il costo al Kg. Quindi il costo della sabbia per singolo pezzo è dato da:

$$C_{Stampo} = C_{sabbia\ unit\grave{a}} f_{riciclo} [\rho_{sabbia} V_{box\ formatura} - \rho_{metallo} (n_c V_{getto} + V_{aliment} + V_{sist}) - \rho_{anima} V_{anima}] \frac{1}{n_c} \quad (2.4)$$

dove

$C_{unit\grave{a}\ stampo}$  = costo unitario della sabbia per lo stampo in  $\frac{\text{€}}{\text{Kg}}$

$f_{riciclo}$  = fattore di riciclo della sabbia

$V_{getto}$  = volume del getto

$V_{sist}$  = volume dell'intero sistema di colata

$V_{aliment}$  = volume di tutti gli alimentatori per ogni stampo

$n_c$  = numero di cavità ( getti ) nella forma

$(n_c V_{getto}) + V_{aliment} + V_{sist}$  = volume del metallo per lo stampo

$\rho_{anima}$  = densità dell'anima in sabbia

$V_{anima}$  = volume dell'anima

$V_{box\ formatura}$  = volume box formatura

Per quanto riguarda il fattore di riciclo  $f_{riciclo}$ , deve tener conto di una percentuale di sabbia che viene persa ad ogni formatura e di un numero di cicli (ipotizzato di dieci cicli) dopo i quali la sabbia deve essere cambiata.

Di seguito sono riportati dei valori di densità per alcuni tipi di sabbie e argille:

Sostanza	Densità ( $\frac{kg}{dm^3}$ )	Sostanza	Densità ( $\frac{kg}{dm^3}$ )
Sabbia e creta (asciutti)	1600	Sabbia e creta(bagnati)	2100
Argilla asciutta	1800	Terra silicea leggera	1500
Argilla bagnata	2000	Terra ghiaiosa asciutta	1600
Malta (calce e sabbia)	1700 - 1800	Terra ghiaiosa umida	1800
Sabbia per forme	1200	Terra argillosa secca	2000
Sabbia per forme pressata	1650	Terra argillosa umida	2300

Tabella 2.4 - Densità di varie tipologie di terre

### 2.1.3 Costo del materiale per le anime

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.

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

$$C_{anima} = C_{unità\ anima} \cdot f_{scarto\ anima} \cdot \rho_{anima} \cdot V_{anima} \quad (2.5)$$

dove

$C_{unità\ anima}$  = costo unitario della sabbia per l'anima in  $\frac{€}{Kg}$

$\rho_{anima}$  = densità dell'anima in sabbia

$V_{anima}$  = volume dell'anima

$f_{scarto\ anima}$  = fattore di scarto dell'anime (variabile con media pari all'8%)

#### 2.1.4 Costo del materiale isolante

Gli isolanti creano un'interfaccia di protezione facendo sì che gli stampi possono essere staccati dal modello senza subire danni. Il materiale isolante è caratterizzato da una bassa conducibilità termica e quindi da un elevato potere di isolamento dovuti all'utilizzo di materiale come resine, polveri o saponi. La bassa densità, l'alto isolamento e la notevole permeabilità permettono una notevole riduzione del volume dei montanti rispetto a quelli in sabbia.

Il costo del materiale isolante è espresso dalla seguente formulazione:

$$C_{anima} = C_{unità\ isolante} \cdot f_{scarto\ isolante} \cdot \rho_{anima} \cdot V_{anima} \quad (2.6)$$

dove

$C_{unità\ isolante}$  = costo unitario dell'isolante in  $\frac{€}{Kg}$

$\rho_{isolante}$  = densità dell'anima in sabbia

$V_{isolante}$  = volume dell'anima

$f_{scarto\ isolante}$  = fattore di scarto dell'isolante

## 2.2 Costo della manodopera

Tale costo è in funzione delle prezzo della manodopera all'ora, del tempo di esecuzione delle operazioni e del numero di operai che lavorano. Le operazioni principali svolte dall'operatore sono la formatura e la pulizia. I tempi delle operazioni di fusione per componente, preparazione sabbia e formatura, vengono calcolati in base al peso di colata, al peso dell'anima, al peso dello stampo e al numero di getti. Il costo del lavoro sarà dato dalla formula:

$$C_{manodopera} = C_{manodopera\ all'ora} (t_{formatura} + t_{pulizia}) \quad (2.7)$$

Dove

$$C_{manodopera\ all'ora} = \text{costo della manodopera} \frac{\text{€}}{\text{ora}}$$

$t$  = tempi principali attività riconducibili alla formatura e alla pulizia del getto

### 2.2.1 Tempo di formatura

La formatura comprende le operazioni di preparazione della terra, lavorazioni dei piani di divisione, la preparazione del modello e degli attacchi e la preparazione delle anime. La stima delle singole operazioni saranno date dalle formule:

$$\text{preparazione terra} = 0,017V_t^{0,678}$$

$$\text{lavorazioni dei piani di divisione} = 3,6S^{0,513}$$

$$\text{preparazione modello} = 11,3V_m^{0,44}$$

$$\text{preparazione attacchi} = 1,57N_m^{0,4} G_r^{0,2}$$

$$\text{preparazione anime} = 1,37N_a^{0,4} V_a^{0,2} \cdot \text{grado di difficoltà}$$

il tempo totale di formatura diventa quindi:

$$t_f = 0,017V_t^{0,678} + 3,6S^{0,513} + 11,3V_m^{0,44} + 1,57N_m^{0,4} G_r^{0,2} + 1,37N_a^{0,4} V_a^{0,2} \cdot \text{grado di difficoltà} \quad (2.8)$$

nel caso in cui non si disponga di tutti gli input richiesti, esiste la formula alternativa:

$$t_f = 3,82V_f^{0,633} S_f^{1,22} \quad (2.9)$$

### 2.2.2 Tempo di pulizia del getto

La pulizia del prodotto è una delle operazioni che richiede la maggior manodopera. Certe operazioni sono assistite da macchine ma non in modo sostanziale. Molte si utilizzano per rimuovere le sbavature e il sistema di colata.

Un'analisi su grandi numeri di getti ha portato ad una approssimazione del tempo totale del lavoro di pulizia dei getti comprensivo di rimozione della sabbia, rimozione del sistema di movimentazione e delle sbavature, come la radice quadrata del peso del getto:

$$T_{pulizia\ manuale} = \frac{\sqrt{\rho_{metallo} V_{getto} \cdot n_c}}{3600} \quad [ore] \quad (2.10)$$

dove

$\rho_{metallo}$  = densità del metallo

$V_{getto}$  = volume del getto

$\rho_{metallo} V_{getto}$  = peso del getto

$n_c$  = numero di cavità (getti) nella forma

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:

$$T_{pulizia\ automatica} = \frac{88,4(\rho_{metallo} V_{getto})^{0,44} \cdot n_c}{3600} \quad [ore] \quad (2.11)$$

dove

$\rho_{metallo}$  = densità del metallo

$V_{getto} = \text{volume del getto}$

$\rho_{metallo} V_{getto} = \text{peso del getto}$

$n_c = \text{numero di cavità (getti) nella forma}$

### 2.3 Costo energetico

Il costo energetico è un fattore particolarmente sensibile per l'Italia, che notoriamente ha un costo del kWh molto elevato rispetto alla media europea.

La preoccupazione per l'efficienza energetica dei processi è cresciuta con il recente aumento dei costi di energia. Le fonderie sentono particolarmente l'influenza delle grandi oscillazioni di prezzo del gas naturale. Fattori come la crescente domanda di energia, aggravati dalle vicissitudini politiche mondiali, incrementeranno la tendenza al rialzo dei costi energetici, premendo sulla necessità di sviluppare soluzioni ad alta efficienza energetica per il processo di fusione.

Sebbene il consumo di energia nel processo di fusione è stato una significativa preoccupazione nelle operazioni di fonderia, l'industria continua ad utilizzare tecnologie di fusione con efficienze di bassa energia.

Nella figura (2.1) è riportata la distribuzione percentuale del costo energetico per il processo produttivo secondo la stima di Assofond:

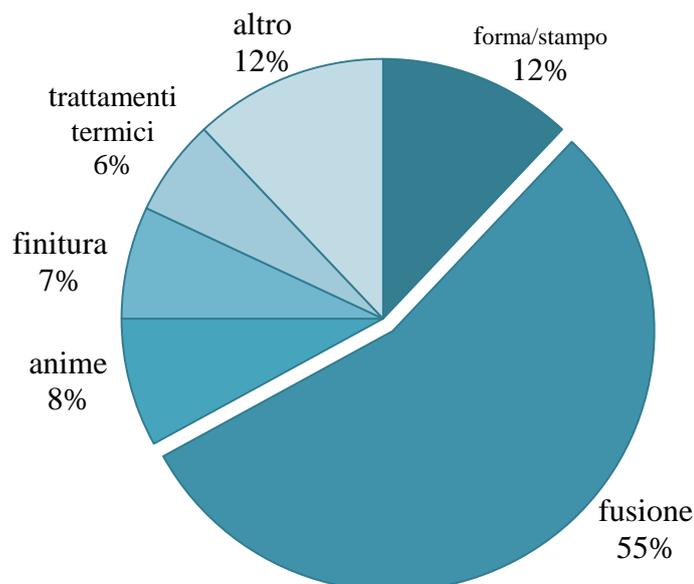


Figura 2.1 - Distribuzione del costo energetico per il processo produttivo 2001

Il modello da noi sviluppato tiene conto dei costi energetici solo di fusione del metallo nei forni che sono, come è possibile vedere dal grafico, il 55% del costo energetico totale. L'energia necessaria per la fusione è stimata utilizzando un'equazione termodinamica, incorporando le relative efficienze, perdite e rendimenti dei forni. Il costo energetico per la fusione del metallo, partendo dalla formula (1.34) dell'Indian Institute of Technology, sarà dato dalla seguente formula:

$$C_{energia} = C_{Costo\ unit\ ener} f_{forno} \rho_{metallo} V_{metallo} f_m f_{resa} [c_{ps}(t_{fus} - t_{amb}) + L + c_{pl}(t_{col} - t_{fus})] \frac{1}{n_c} \quad (2.12)$$

*Dove*

$C_{costo\ uni\ ener}$  = costo unitario dell'energia in  $\frac{\epsilon}{j}$

$f_{forno}$  = fattore di efficienza del forno

$\rho_{metallo}$  = densità della lega

$V_{getto}$  = volume del getto

$\rho_{metallo} V_{metallo}$  = peso del getto in Kg

$f_m$  = fattore di perdita di metallo in fusione

$f_{resa}$  = fattore di resa complessiva =  $1 + \frac{\rho_{metallo} V_{sist} + \rho_{metallo} V_{aliment}}{n_c + \rho_{metallo} V_{getto}}$

$V_{sist}$  = volume dell'intero sistema di colata

$\rho_{metallo} V_{sist}$  = peso dell'intero sistema di condotto di colata in Kg

$V_{aliment}$  = volume di tutti gli alimentatori per ogni stampo

$\rho_{metallo} V_{aliment}$  = peso di tutti gli alimentatori di ogni stampo in Kg

$n_c$  = numero di cavità (getti) nella forma

$V_{getto}$  = volume del getto

$\rho_{metallo} V_{getto}$  = peso del getto in Kg

$c_{ps}$  = calore specifico del metallo in fase solida  $\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$

$t_{fus}$  = temperatura di fusione in  $^\circ C$

$t_{amb}$  = temperatura ambiente in  $^\circ C$

$C_{pl}$  = calore specifico del metallo in fase liquida in °C

$L$  = calore latente di fusione del metallo  $\frac{J}{kg}$

$t_{col}$  = temperatura colata o temperatura rubinetto in °C

Per quanto riguarda i fattori di perdita di metallo e di efficienza termica delle varie tipologie di forno, sono riportati in tabella alcuni valori dalla letteratura:

Tipologia Forno	Capacità tipica (tonnellate)	Lega usata	Perdita metallo	Efficienza termica	
<i>Crogiolo (Gas)</i>	0,07-100	Alluminio	4-6%	7-19%	
		Magnesio	4-6%	7-19%	
		Rame	2-3%	7-15%	
<i>Cupola</i>	0,05-20 per ora	Ferro	3-12%	40-50%	
<i>Arco diretto *</i>	1,5 -100	Acciaio	5-8%	35-45%	
<i>A immersione</i>	0,7 per ora	Zinco	N/A	63-67%	
<i>A induzione *</i>	0,01-50	Alluminio	0.75-1.25%	59-76%	
		Rame	2-3%	50-70%	
		Magnesio	2-3%	59-76%	
		Ferro	1-2%	50-70%	
		Acciaio	2-3%	50-70%	
<i>A riverbero</i>	Elettrico *	0.5 - 125	Alluminio	1-2%	59-76%
		Zinco	2-3%	59-76%	
	Gas	0.5 - 125	Alluminio	3-5%	30-45%
			Zinco	4-7%	32-40%

Tabella 2.5 - Efficienze e perdita metallo per i diversi forni

## 2.4 Costo delle lavorazioni delle attrezzature

I costi di lavorazione delle attrezzature sono i costi per la realizzazione di stampi (se in conchiglia), modelli e placche modello, casse anima. Sono quindi costi fissi e che non dipendono dal processo fusorio in quanto si sostengono all'avvio e vengono ammortizzati durante la produzione e sono costi che la fonderia sostiene pagando diret-

tamente una modellera che realizza le attrezzature di colata. Nel modello da noi elaborato abbiamo scelto di proporre il modello più dettagliato per il costo di attrezzaggio in base alla complessità delle forma che definisce il fattore di complessità in base a sei parametri geometrici che comprendono il numero di numero delle anime, il rapporto di volume e di superficie, il volume di delle anime, lo spessore della sezione e la draw distance del volume precedente secondo le formule (1.40), (1.41), (1.42), (1.43), (1.44), (1.45), (1.46), (1.47). Di seguito, per una maggiore chiarezza, andremo in maniera riassuntiva a ridefinire tali parametri:

1. *Rapporto del volume del pezzo*  $C_{PR}$

è dato dal rapporto tra il volume del pezzo e il volume del riquadro di delimitazione. Il riquadro è dato dalla lunghezza, larghezza e altezza massime della geometria del pezzo. Questo criterio è definito come:

$$C_{PR} = 1 - \frac{V_p}{V_b} \quad (2.12)$$

2. *Rapporto dell'area*  $C_{AR}$

$C_{AR}$  è il rapporto tra la superficie di una sfera equivalente (con lo stesso volume del pezzo) e la superficie del pezzo. Questo rapporto si basa sul fatto che la sfera ha superficie minima rispetto a qualsiasi altra geometria. Più alto sarà il rapporto e più alto sarà il costo. Questo criterio è definito come:

$$C_{AR} = 1 - \frac{A_s}{A_p} \quad (2.13)$$

3. *Numero di anime*  $C_{NC}$

Più alto sarà il numero di anime, più alto sarà il costo di attrezzaggio. Il criterio del numero di anime è definito come segue, considerando che il tasso di aumento della complessità della forma aumenta con il numero di anime:

$$C_{NC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(1+NC)}} \quad (2.14)$$

4. *Rapporto del volume dell'anima*  $C_{CR}$

Più grandi sono le anime e più grandi saranno i costi di attrezzaggio. Quindi il rapporto tra il volume dell'anima e il volume del riquadro di delimitazione è un'altra misura di complessità :

$$C_{CR} = \frac{\sum_i V_{C_i}}{V_b} \quad (2.15)$$

5. *Rapporto di spessore*  $C_{TR}$

$C_{TR}$  è il rapporto di spessore minimo e massimo della parte. Le sezioni sottili sono più difficili da lavorare rispetto a una sezione spessa. Questo criterio è definito come:

$$C_{TR} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (2.16)$$

6. *Rapporto di profondità*  $C_{DR}$

La draw distance, che è la profondità massima degli utensili, influisce sui tempi di produzione e quindi sul costo. L'effettiva draw distance viene confrontata con la minima draw distance possibile, che è la metà della dimensione minima della parte. Il criterio è progettato in modo che parti con rapporto di profondità superiore indichino maggiore complessità.

$$C_{DR} = 1 - \frac{0,5(\min(L,M,H))}{D_d} \quad (2.17)$$

Il fattore di complessità della forma complessiva può essere stimato dalla somma ponderata dei singoli criteri sopra descritti:

$$CF_{stimata} = w_0 + w_1 C_{PR} + w_2 C_{AR} + w_3 C_{NC} + w_4 C_{CR} + w_5 C_{TR} + w_6 C_{DR} \quad (2.18)$$

I costi di attrezzaggio è solitamente maggiore per parti con maggiore complessità. Per lavorazioni di una forma semplice, come un cubo, l'attrezzaggio e le lavorazioni con macchinari tradizionali sono a basso costo. Se lo stesso volume deve essere ri-

mosso per una forma complessa, può richiedere lavorazioni con macchine a controllo numerico con frese multiple, portando ad un costo molto elevato.

In base alle considerazioni sulle regressioni calcolate su un campione di 40 pezzi, sono stati calcolati i pesi della formula che diventa:

$$CF_{stimata} = 5,7 + 10,8C_{PR} + 18,0C_{AR} + 32,7C_{NC} + 29,0C_{CR} + 6,9C_{TR} + 0,7C_{DR} \quad (2.19)$$

Tale coefficiente viene poi moltiplicato per il costo della lavorazione del parallelepipedo base e diviso per il numero di pezzi che verranno realizzati con l'attrezzatura:

$$C_{attrezzature} = \frac{C_{parallelepipedo} \cdot CF_{stimata}}{Q} \quad (2.20)$$

Per quanto riguarda il costo di lavorazione del parallelepipedo base la letteratura disponibile ipotizza un valore pari a 1000 Rupie Indiane pari a circa 13 €, nel paragrafo successivo ipotizzeremo un valore di realizzazione più congruo alla realtà italiana.

## 2.5 Costo di finitura

I costi di finitura sono divisi in trattamenti superficiali, che comprendono la lucidatura, la placcatura, l'anodizzazione e la verniciatura, e in trattamenti termici che non saranno però trattati nel dettaglio.

$$C_{finitura} = C_{trattamenti\ superficiali} \quad (2.21)$$

### 2.5.1 Costi dei trattamenti superficiali

Per quanto riguarda i trattamenti superficiali il prodotto deve essere coperto per prevenire la corrosione, l'usura e anche per migliorarne l'aspetto. La lucidatura in molti casi è l'unico trattamento per i getti d'alluminio, o la preparazione per il rivestimento, placcatura per le leghe di zinco. Prima di ricoprire, le parti necessitano di una serie di pulizie per rimuovere tutte le contaminazioni che non permetterebbero l'adesione del prodotto usato per la copertura. Di solito si usa eseguire uno sgrassa-

mento , una pulizia alcalina e un bagno acido. Successivamente alla pulizia, è possibile eseguire diversi strati di protezione, il tutto dipende dal tipo di lega. L'elettrolitico è prevalentemente usato per le leghe di zinco, perché l'alluminio e il magnesio ossidano velocemente. L'anodizzazione è usata per le leghe di alluminio, zinco e magnesio, servono per dare resistenza alla corrosione e all'usura, e serve per dare una base durevole per la verniciatura. La più comune forma di copertura estetica utilizzata è la verniciatura, la verniciatura si applica anche in modo elettrostatico e a polvere. Il processo di impregnatura si utilizza quando il materiale ha una porosità che può creare qualche inconveniente strutturale o è usato per contenere liquidi per tanto tempo o fluidi in pressione. Il processo consiste nel mettere il getto in una camera a vuoto, si svuotano i pori e si immerge l'oggetto nel sigillante. Il sigillante è forzato ad entrare nei pori una volta che il tutto è portato alla pressione atmosferica. Il costo dei trattamenti superficiali è spesso rappresentato come costo per area di superficie trattata:

$$C_{\text{trattamenti superficiali}} = \frac{C_{50 \text{ cm}^2 \text{ superficie}} \cdot A_p}{50} \quad [\text{€ cent}] \quad (2.22)$$

Dove

$A_p$  = superficie del pezzo

$C_{50 \text{ cm}^2 \text{ superficie}}$  = costo per  $\text{cm}^2$  di superficie [€ cent]

La tabella in seguito elenca i costi tipici dei principali trattamenti superficiali:

Processi di finitura superficiale	$C_{50 \text{ cm}^2 \text{ superficie}}$ (cent)
Sostanze impregnanti	1.8
Placcatura CU/Ni/Cr	4.5
Lucidatura	1.3
Anodizzazione	1.6
Pittura finita	2.4

Tabella 2.6 - Costi dei più usati processi di finitura

Per concludere, ricapitoliamo le variabili necessarie per effettuare la stima di prevenzione di un getto dividendole in variabili di processo e variabili geometriche:

<i>Variabili di processo ( input )</i>	<i>Variabili ricavabili</i>
Tipo di lega metallica con costo unitario relativo di acquisto	$C_{\text{unità materiale}}$ , $\rho_{\text{metallo}}$ , $C_{ps}$ , $t_{\text{fusione}}$ , <i>calore latente</i> $L$ , $C_{pl}$
Tipo di sabbia con costo unitario relativo di acquisto	$C_{\text{stampo sabbia}}$ , $\rho_{\text{sabbia}}$ ,
Costo unitario energia	$C_{\text{energia}}$
Tipologia forno (induzione, cupola, gas, elettrico)	$f_m = \text{fattore perdita metallo in fusione}$ $f_{\text{forno}} = \text{fattore di efficienza del forno}$
Temperatura di colata	$C_{\text{energia}}$
Trattamenti termici (temperature e durate)	$C_{\text{trattamenti termici}}$
Costo manodopera all'ora	$C_{\text{manodopera}}$
Riciclo sabbia	$f_{\text{riciclo sabbia}}$ , $C_{\text{stampo}}$

Tabella 2.7 - Variabili di processo

<i>Variabili geometriche ( input )</i>	<i>Variabili ricavabili</i>
Volume del componente finito	$\text{peso del getto} = \rho_{\text{metallo}} V_{\text{getto}}$
Volume totale delle parti anima e numero di anime per pezzo	$\text{peso anima} = \rho_{\text{metallo}} V_{\text{anima}}$ , complessità anima $C_{NC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{(1+NC)}}$ , rapporto volume anime $C_{CR} = \frac{\sum_i V_{Ci}}{V_b}$
Numero pezzi per grappolo	$C_{\text{stampo}}$ , $C_{\text{energia}}$ , <i>fattore resa complessiva</i>
Superficie totale del pezzo finito	$\text{rapporto area } C_{AR} = 1 - \frac{A_s}{A_p}$ $C_{\text{trattamenti superficiali}}$
Volume alimentatori + Numero alimentatori e Volume sistema di colata + Numero attacchi di colata	$f_{\text{resa}} = \text{fattore resa complessiva}$
Dimensioni (L, W, H) della staffa utilizzata	$t_{\text{formatra}}$
Numero montanti	$t_{\text{formatra}}$
Spessore massimo e spesso minimo del componente finito	<i>Rapporto di spessore</i> $C_{TR}$ $C_{TR} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}$
Draw distance	<i>Rapporto profondità</i> $C_{DR} = 1 - \frac{0,5(\min(L, M, H))}{D_d}$

Tabella 2.8 - Variabili geometriche

### Capitolo 3 Applicazione del modello ai casi

Per simulare il modello dei costi proposto sono stati usati alcuni casi applicativi forniti dall'Università di Bologna e dall' Indian Institute of Technology. Elencheremo brevemente i pezzi scelti esponendo i dati geometrici ricavati con un software CAD.

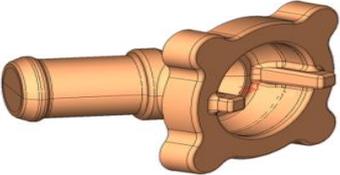
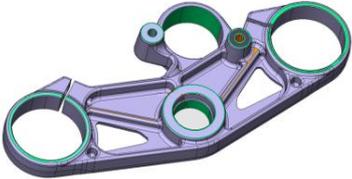
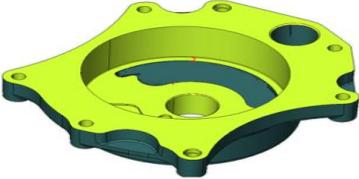
Componente 1		
	<b>Volume getto (<math>dm^3</math>)</b>	<b>0,027</b>
	<b>Superficie getto (<math>dm^2</math>)</b>	<b>1,106</b>
	<b>Numero anime</b>	<b>1</b>
	<b>Volume anima (<math>dm^3</math>)</b>	<b>0,09</b>
Componente 2		
	<b>Volume getto (<math>dm^3</math>)</b>	<b>0,187</b>
	<b>Superficie getto (<math>dm^2</math>)</b>	<b>6,74</b>
	<b>Numero anime</b>	<b>0</b>
	<b>Volume anime (<math>dm^3</math>)</b>	<b>0</b>
Componente 3		
	<b>Volume getto (<math>dm^3</math>)</b>	<b>0,224</b>
	<b>Superficie getto (<math>dm^2</math>)</b>	<b>19229,1</b>
	<b>Numero anime</b>	<b>2</b>
	<b>Volume totale anime (<math>dm^3</math>)</b>	<b>0,054</b>

Tabella 3.1 - Dati geometrici dei casi applicati

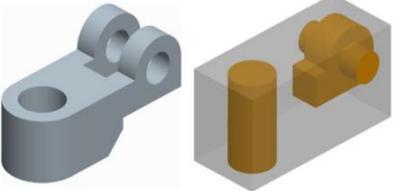
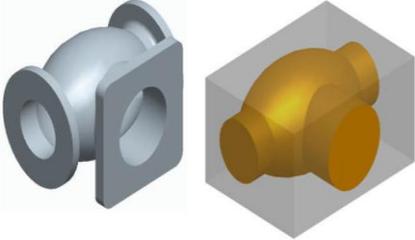
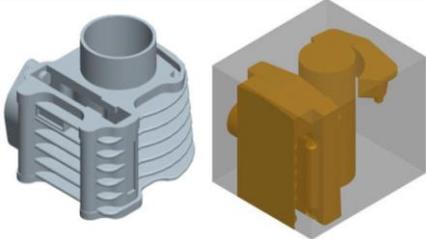
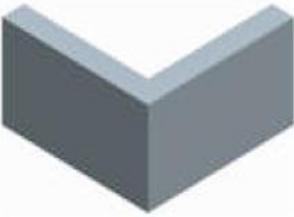
Componente 4		
	Volume getto ( $dm^3$ )	1,089
	Superficie getto ( $dm^2$ )	11,13
	Numero anime	2
	Volume tot anime ( $dm^3$ )	0,58
Componente 5		
	Volume getto ( $dm^3$ )	6,361
	Superficie getto ( $dm^2$ )	71,96
	Numero anime	1
	Volume anime ( $dm^3$ )	10,03
Componente 6		
	Volume getto ( $dm^3$ )	0,298
	Superficie getto ( $dm^2$ )	10,67
	Numero anime	3
	Volume anime ( $dm^3$ )	0,308
Componente 7		
	Volume getto ( $dm^3$ )	8,88
	Superficie getto ( $dm^2$ )	40,88
	Numero anime	0
	Volume anime ( $dm^3$ )	0
Componente 8		
	Volume getto ( $dm^3$ )	2,65
	Superficie getto ( $dm^2$ )	44,77
	Numero anime	6
	Volume anime ( $dm^3$ )	1,91

Tabella 3.2 - Dati geometrici dei casi applicati

### 3.1 Costo del materiale

Come materiale è stato scelto la lega di alluminio A356-G AlSi7Mg0,3. Una lega adatta a realizzare getti con disegni complessi, ottenendo caratteristiche meccaniche elevate, buona tenuta a pressione e saldabilità. Viene impiegata nell'industria motoristica, delle ferrovie, dell'aeronautica e degli armamenti.

LEGA	Elementi											Impurezze singolo	Impurezze globali
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti		
Min	6,5				0,30						0,10		
Max	7,5	0,15	0,03	0,10	0,45	-	-	0,07	-	-	0,18	0,3	0,10

Tabella 3.3 - Composizione chimica

L'alluminio puro resiste bene agli acidi organici ed all'acido nitrico concentrato perché forma al loro contatto un leggero strato di ossido di alluminio, inattaccabile, che protegge gli strati inferiori. Questo fenomeno è conosciuto col nome di "passivazione". L'affinità dell'alluminio con l'O<sub>2</sub> viene sfruttata in metallurgia. L'alluminio non resiste invece agli alcali né a molti sali metallici perché essendo fortemente elettro-positivo può spostare gli ioni metallici più deboli dalle loro soluzioni. Non resiste infine agli alogeni, mentre è adatto per contenere idrocarburi, resine, cellulose, ammoniacale, colle ecc. La resistenza alla corrosione è comunque molto legata alla purezza del metallo. Abbastanza singolare è il comportamento del modulo di elasticità che rimane praticamente costante, o aumenta molto leggermente, anche nel caso di leghe trattate termicamente quindi con valori di resistenza molto alta; per questo agli effetti della rigidità di una costruzione di alluminio non è necessario incorrere ad una lega con caratteristiche di resistenza particolarmente elevate. L'alluminio è inoltre molto duttile e malleabile, può essere tirato in fogli sottili fino a 7 micron.

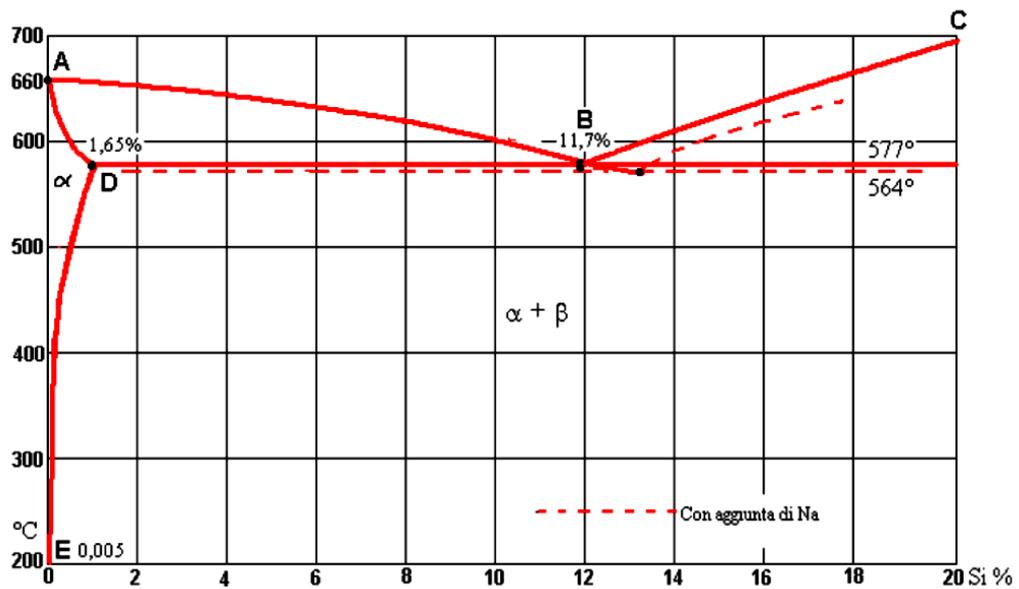


Figura 3.1 - Diagramma alluminio-silicio

Il silicio aumenta del 13% la colabilità, il ritiro, la fragilità a caldo e la compattezza sono migliori di qualsiasi altra lega. La lavorabilità all'utensile è invece la peggiore, per la presenza di piccoli cristalli di Si durissimi che rovinano il tagliente degli utensili. Col tempo le leghe di Si tendono a diventare grigie.

Stato fisico colata	simbolo	Carico unitario di rottura		Carico al limite di snervamento		Allungamento		Durezza Brinell	
		Mpa	N/mm <sup>2</sup>	Mpa	N/mm <sup>2</sup>	%	%	HBW	HB
IN SABBIA	F		140-220		80-140		2-6		45-60
Parzialmente invecchiato	T64		200-270		120-170		4-10		60-80
Temprato ed invecchiato artif.	T6	230	240-320	190	220-280	2	3-6	75	80-110
IN CONCHIGLIA	F		180-240		90-150		4-8		50-65
Parzialmente invecchiato	T64	290	260-340	210	220-280	4	5-9	90	80-100
Temprato ed invecchiato artif.	T6	260	220-270	180	120-180	8	6-12	80	65-85

Tabella 3.4 - Caratteristiche meccaniche rilevate su provette colate

Peso specifico	2,66 $Kg/dm^3$	Conduttività termica ( a 20 °C)	180 $W/(m K)$
Intervallo di solidificazione e fusione	550 °C	Dilatazione termica da 20 a 100 °c	
Calore specifico (a 100°C)	625 °C	Dilatazione termica da 20 a 200 °c	22,0 – 10 / °C
Ritiro lineare in sabbia	0,92 $J/Gk$	Temperatura max di fusione	780 °C
Ritiro lineare in conchiglia	1,05 – 1,1 %	Intervallo ottimo di colata in:	
Conduttività elettrica	21 – 27 $MS/m$	-sabbia	680 -750 °C
Modulo elastico	7400 $m/mm^2$	-conchiglia	680 -750 °C

Tabella 3.5 - Proprietà fisiche tratti dalle normative UNI

Resistenza meccanica a caldo	SCARSA	Resistenza alla cricatura di ritiro	PICCOLA
Resistenza alla corrosione	BUONA	Tenuta a pressione	BUONA
Lavorabilità all'utensile	BUONA	Saldabilità	OTTIMA
Colabilità	BUONA	Attitudine all'anodizzazione decorativa	CATTIVA
Lucidabilità	MEDIA	Attitudine all'anodizzazione protettiva	CATTIVA

Tabella 3.6 - Caratteristiche tecnologiche e indicazioni qualitative

Il costo della lega A356 è dato dal valore medio dalle quotazioni LME (London Metal Exchange) del 2013. Con cadenza trimestrale viene calcolato il costo medio della materia prima e questo viene mantenuto invariato nel corso di tutto il trimestre successivo.

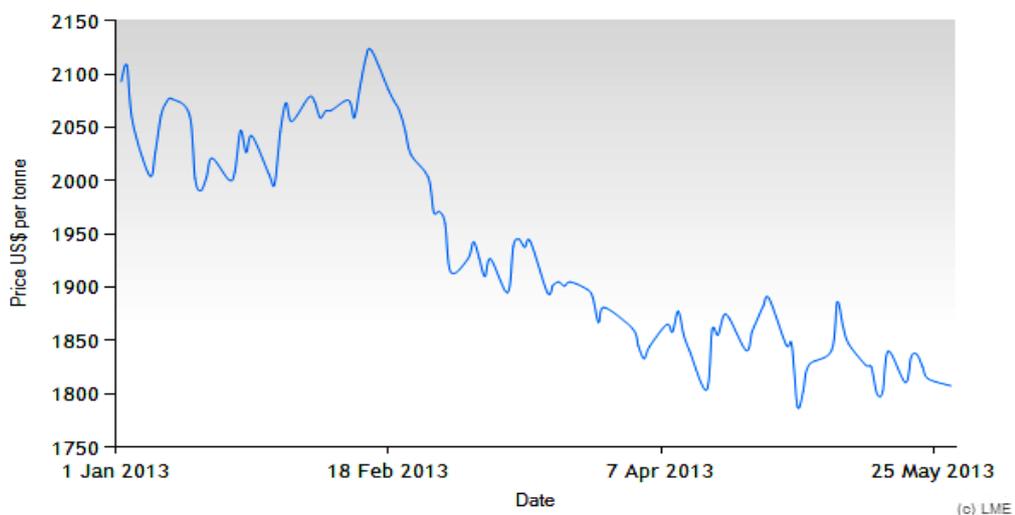


Figura 3.2 - Andamento del costo della lega di alluminio

Dall'analisi dei dati disponibili dal London Metal Exchangee risulta che il costo sia di  $1.720,45 \frac{\$}{t}$ ; riportando tale valore con il cambio valuta attuale si ha un costo di  $2.001,542 \frac{\text{€}}{t}$  che riportandolo in Kg equivale a  $2,00 \frac{\text{€}}{\text{Kg}}$ .

Facendo riferimento a quanto detto precedentemente riguardo alla lega di alluminio ricapitoliamo nella tabella (3.7) il costo, la densità della lega e della sabbia per le anime e per la formatura.

<i>densità metallo</i> $\text{Kg}/\text{dm}^3$	2,667
<i>costo metallo</i> $\text{€}/\text{Kg}$	2,00
<i>densità sabbia (chimica)</i> $\text{Kg}/\text{dm}^3$	1,59
<i>costo sabbia</i> $\text{€}/\text{Kg}$	0,15
<i>densità sabbia anima</i> $\text{Kg}/\text{dm}^3$	1,7
<i>costo sabbia anima</i> $\text{€}/\text{Kg}$	0,3

Tabella 3.7 - Dati operativi per determinare i costi dei materiali

Per stimare il volume della materozze di ogni caso applicativo è stato considerato il doppio del volume del getto maggiorato di una percentuale (20%) di sicurezza parametrizzata e quindi personalizzabile a seconda dei vari casi. Anche per il volume del getto è stato considerato come rapporto parametrizzato (20%) rispetto al volume del getto.

In questo modo chiaramente la resa, intesa come il rapporto tra peso del getto e peso del metallo colato, sarà uguale per tutti i casi applicativi ma, dovendo preventivare prima della progettazione e del dimensionamento delle materozze e del canale di colata è necessario parametrizzare tali valori. Per tutti i casi applicativi è stato ipotizzato un sistema di colata per la realizzazione di un singolo pezzo.

Per quanto riguardo il calcolo del volume delle anime è stato calcolato misurando con un software Cad le cavità e maggiorandole di un 20%, per alcuni casi applicativi invece i volumi erano già presenti nella documentazione. Il fattore di riciclo della sabbia è anch'esso parametrizzato, ma dalla letteratura e dalla consultazione di alcune fonderie il tasso di riutilizzo è molto alto e quindi ipotizzato intorno al 90% per il box di formatura e 80% per le anime. Come specificato in precedenza il fattore di ri-

ciclo tiene conto anche del numero di cicli dopo i quali la sabbia deve essere cambiata: Pertanto, un decimo del 90% della sabbia riutilizzabile verrà computata nel costo della sabbia, oltre, ovviamente, al 10% che viene perso.

Per quanto riguarda il calcolo del volume del box di formatura è stato ipotizzato di aumentare di 50mm le tre dimensioni del cubo ottenuto dalla somma dei volumi del getto, delle materozze e del volume del getto maggiorata da un coefficiente di sicurezza parametrizzato. Il valore di 50 mm è la distanza ritenuta necessaria per evitare distorsioni che potrebbero verificarsi a causa dello shock termico presente al momento della colata dell'alluminio fuso a 750°C all'interno dello stampo avente una temperatura decisamente inferiore (300°C).

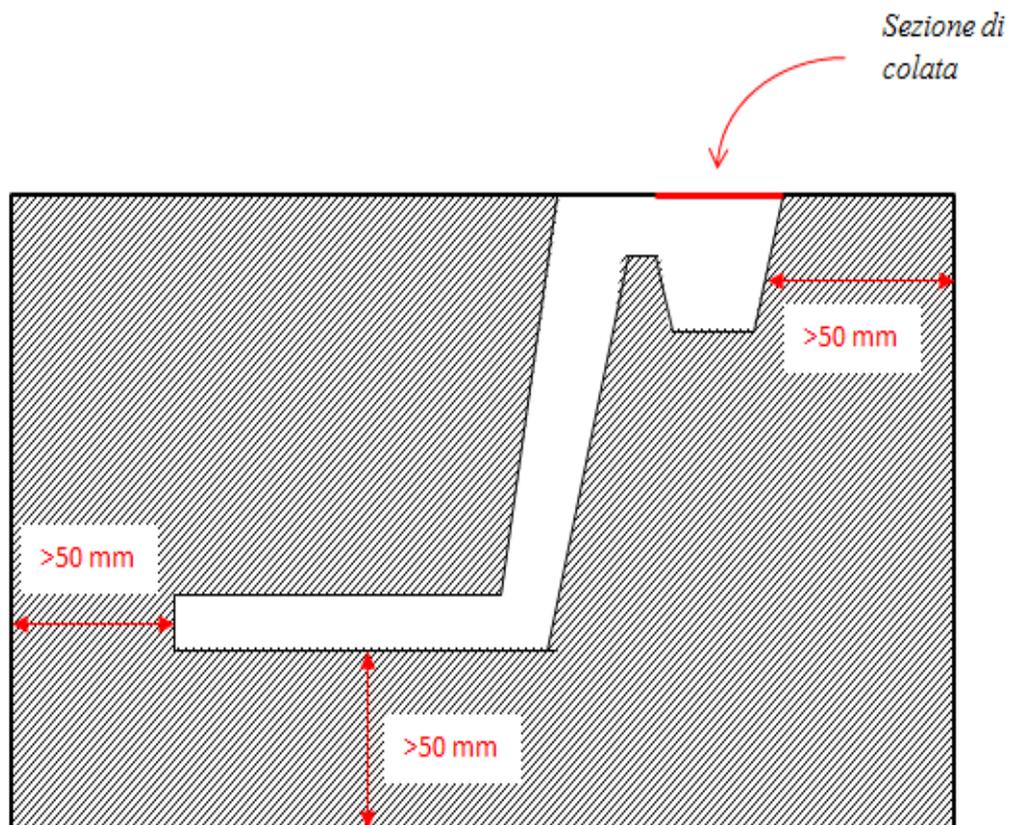


Figura 3.3 - Dimensionamento del box di formatura

Il Box di formatura così ottenuto, conoscendo il volume di ingombro dei componenti applicativi, è stato poi adattato alle dimensioni delle staffe secondo le norme UNI 6765-70, poiché la realizzazione di una staffa su misura avrebbe costi molto più ele-

vati rispetto a quelle standard disponibili in commercio. Di seguito sono esposte le dimensioni delle staffa UNI 6765 – 70 nella figura e tabella seguente:

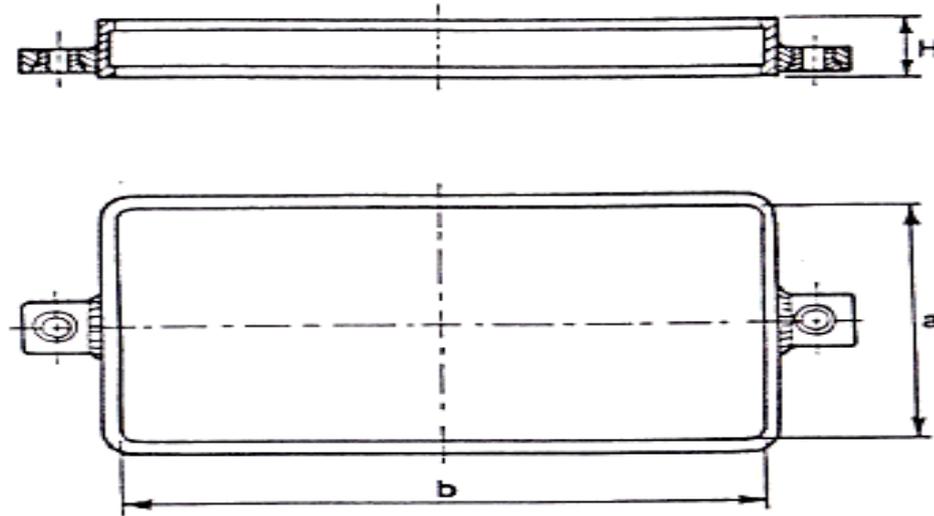


Figura 3.4 – Dimensioni staffa UNI 6765-70

Ai fini pratici è stata considerata solo la staffa con base quadrata:

a	b	h											
315	315	50	63	80	100	125	160	200					
355	355	50	63	80	100	125	160	200					
400	400	--	--	80	100	125	160	200	250				
450	450	--	--	80	100	125	160	200	250				
500	500	--	--	--	100	125	160	200	250	300			
560	560	--	--	--	100	125	160	200	250	300			
630	630	--	--	--	100	125	160	200	250	300	355		
710	710	--	--	--	--	125	160	200	250	300	355	400	
800	800	--	--	--	--	125	160	200	250	300	355	400	500
900	900	--	--	--	--	--	160	200	250	300	355	400	500

Tabella 3.8 - Dimensione staffa UNI 6765-70

Nella tabella (3.9) è stata calcolata la stima dei costi dei materiali. Facendo riferimento alla formula (2.3) il costo della lega il costo varia tra un minimo di 0,15 € ed un massimo di 49,73 €

<b>Costo della lega</b>			
<b>caso applicativo</b>	<b>Vgetto (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>f perdita metallo</b>	<b>Totale €</b>
Componente 1	0,027	1,05	<b>0,15</b>
Componente 2	0,187	1,05	<b>1,04</b>
Componente 3	0,224	1,05	<b>1,25</b>
Componente 4	1,089	1,05	<b>6,10</b>
Componente 5	6,361	1,05	<b>35,62</b>
Componente 6	0,298	1,05	<b>1,67</b>
Componente 7	8,88	1,05	<b>49,73</b>
Componente 8	2,65	1,05	<b>14,87</b>

Tabella 3.9 - Costo della lega

Per quanto riguarda il costo della sabbia calcolato secondo la formula (2.4) i valori sono molto bassi data l'alta percentuale di riciclo della sabbia. Per il calcolo del volume del canale di alimentazione si ipotizza come il doppio del volume del getto maggiorato di un 20%, mentre per il volume del sistema di colata si ipotizza che sia il 20% del volume del getto:

<b>Costo della sabbia per lo stampo</b>					
<b>caso applicativo</b>	<b>Valimen (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vsist col (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vanim (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vbox UNI (dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tot €</b>
Componente 1	0,06	0,005	0,09	6,25	<b>0,27</b>
Componente 2	0,44	0,037	55,4	7,93	<b>0,32</b>
Componente 3	0,53	0,044	0,05	6,25	<b>0,24</b>
Componente 4	2,61	0,217	0,58	12,40	<b>0,35</b>
Componente 5	15,26	1,27	10,03	75	<b>1,87</b>
Componente 6	0,71	0,059	0,308	9,92	<b>0,38</b>
Componente 7	21,31	1,77	0	50,62	<b>0,84</b>
Componente 8	6,37	0,531	1,91	19,84	<b>0,37</b>

Tabella 3.10- Costo della sabbia per lo stampo

Per il calcolo delle anime secondo la formula (2.5) è stato ipotizzato un fattore di riciclo più basso rispetto alla sabbia per la formatura ed un costo unitario al chilo maggiore:

Costo sabbia per le anime			
<i>caso applicativo</i>	Vanime (dm <sup>3</sup> )	friciclo anima (%)	Totale €
Componente 1	0,09	80	<b>0,10</b>
Componente 2	0	80	<b>0</b>
Componente 3	0,05	80	<b>0,01</b>
Componente 4	0,58	80	<b>0,06</b>
Componente 5	10,03	80	<b>1,02</b>
Componente 6	0,3	80	<b>0,03</b>
Componente 7	0	80	<b>0</b>
Componente 8	1,91	80	<b>0,19</b>

Tabella 3.11 - Costo della sabbia per le anime

Sommando i tre costi calcolati precedentemente si ottiene il costo totale dei materiali nella tabella (3.12):

Costo totale del materiale				
<i>caso applicativo</i>	Costo totale della lega	Costo totale sabbia per lo stampo	Costo totale sabbia per le anime	Totale €
Componente 1	0,15	0,27	0,10	<b>0,52</b>
Componente 2	1,04	0,32	0	<b>1,37</b>
Componente 3	1,25	0,24	0,01	<b>1,50</b>
Componente 4	6,10	0,35	0,06	<b>6,51</b>
Componente 5	35,62	1,87	1,02	<b>38,52</b>
Componente 6	1,67	0,38	0,03	<b>2,09</b>
Componente 7	49,73	0,84	0	<b>50,57</b>
Componente 8	14,87	0,37	0,19	<b>15,44</b>

Tabella 3.12 - Costo totale del materiale

### 3.2 Costo della manodopera

Per il costo della manodopera è stata utilizzata la formula (2.7) . La stima del tempo medio di pulitura del pezzo manuale è data dalla formula (2.10) moltiplicata per un fattore correttivo che tiene conto della complessità del pezzo (che analizzeremo nel dettaglio in seguito). Secondo il rapporto sull'Industria delle fonderie lo stipendio medio all'ora di un operaio metalmeccanico è di 18 €/h:

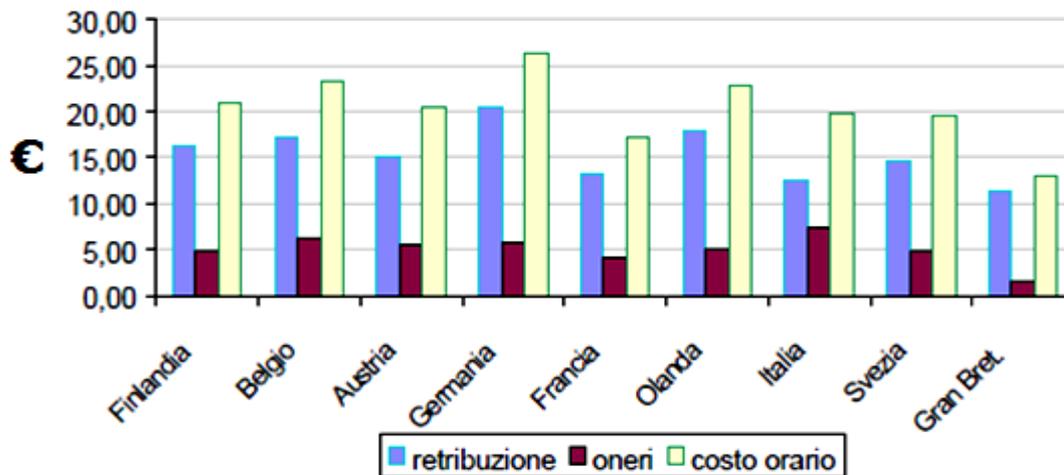


Figura 3.5 - Costo del lavoro in alcuni paesi della UE (espresso in EURO)

Di seguito nella tabella (3.13) è stato calcolato il costo della manodopera con pulitura manuale:

Costo della manodopera con pulitura manuale					
caso applicativo	Vgetto (dm <sup>3</sup> )	Complessità	t pul (ore)	t pul (minuti)	Totale €
Componente 1	0,027	0,53	0,14	8,6	<b>2,60</b>
Componente 2	0,187	0,24	0,51	30,5	<b>3,16</b>
Componente 3	0,224	0,50	0,32	19,7	<b>6,98</b>
Componente 4	1,089	0,47	0,8	48,1	<b>14,42</b>
Componente 5	6,361	0,54	2,22	133,5	<b>40,07</b>
Componente 6	0,298	0,58	0,52	31,4	<b>9,42</b>
Componente 7	8,88	0,12	0,62	37,3	<b>11,2</b>
Componente 8	2,65	0,60	1,61	96,9	<b>29,07</b>

Tabella 3.13 - Costo della manodopera con pulitura manuale

Tale analisi ha portato a tempi di pulitura manuale molto alti con incidenza sui costi notevole. A tal proposito abbiamo ipotizzato una pulizia automatica dei pezzi usando la formula (2.11) tenendo invariato lo stipendio medio all'ora dell'operaio metalmeccanico:

costo manodopera con pulitura automatica				
<i>caso applicativo</i>	$V_{\text{getto}} \text{ (dm}^3\text{)}$	$t_{\text{pul}} \text{ (ore)}$	$t_{\text{pul}} \text{ (min)}$	<b>Totale €</b>
Componente 1	0,027	0,01	0,46	<b>0,13</b>
Componente 2	0,187	0,02	1,08	<b>0,32</b>
Componente 3	0,224	0,019	1,17	<b>0,35</b>
Componente 4	1,089	0,039	2,35	<b>0,71</b>
Componente 5	6,361	0,08	5,12	<b>1,53</b>
Componente 6	0,298	0,022	1,33	<b>0,4</b>
Componente 7	8,88	0,098	5,92	<b>1,77</b>
Componente 8	2,65	0,058	3,48	<b>1,04</b>

*Tabella 3.14 - Costo della manodopera con pulitura automatica*

Dato il costo considerevolmente più basso della pulitura automatica per il calcolo successivo del costo totale è stata considerata solo la pulitura automatica; anche se la nostra ipotesi tiene conto della realizzazione di un singolo pezzo e non di un grappolo che naturalmente andrebbe ad aumentare il tempo.

Per quanto riguarda la stima dei tempi di formatura le formule (2.8) e (2.9) non hanno portato a livello operativo a soluzioni accettabili. Per sopperire a tale mancanza, grazie alla collaborazione con Ecaconsult e la consultazione tramite il software di dati storici del 1998 di una fonderia, abbiamo reperito i tempi di formatura di 4983 pezzi dei quali non è conosciuta la geometria ma solo il peso espresso in Kg. Da un'analisi preliminare dei dati è visibile una variabilità dei tempi molto elevata compresa tra 1 minuto e 30 minuti.

Per stimare i tempi dei casi applicativi abbiamo filtrato i dati dividendoli in intervalli con ordini di grandezza congrui al peso di quelli applicativi e poi fatto una media:

<i>caso applicativo</i>	peso medio (Kg)	Intervallo analisi dati	Tmin (minuti)	Tmax (minuti)	Tmedio (minuti)
Componente 1	0,07	$0,01 \leq (Kg) \leq 0,5$	1,5	30	<b>7</b>
Componente 2	0,49	$0,5 \leq (Kg) \leq 1$	2,5	30	<b>8</b>
Componente 3	0,59	$0,5 \leq (Kg) \leq 1$	2,5	30	<b>8</b>
Componente 4	2,9	$2,5 \leq (Kg) \leq 3,0$	2,5	30	<b>15</b>
Componente 5	16,96	$16,5 \leq (Kg) \leq 17,0$	15	30	<b>22</b>
Componente 6	0,79	$0,5 \leq (Kg) \leq 1$	2,5	30	<b>8</b>
Componente 7	23,68	$23,5 \leq (Kg) \leq 24$	15	30	<b>26</b>
Componente 8	7,08	$7,00 \leq (Kg) \leq 7,5$	3	30	<b>20,3</b>

Tabella 3.15 – Stima peso medio per ogni caso applicativo

La stima dei tempi medi di formatura segue una proporzionalità diretta con il peso dei getti:

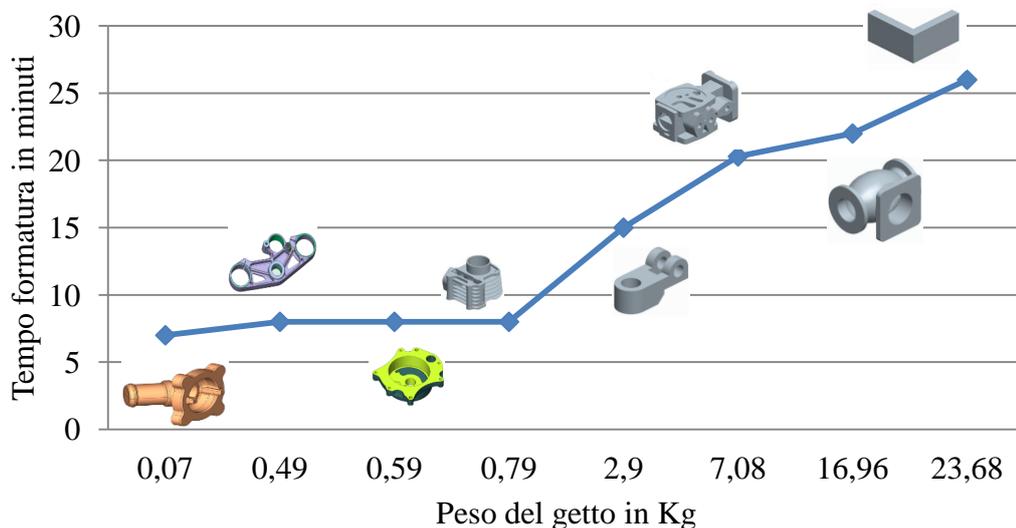


Figura 3.6 - grafico peso del getto/tempi di formatura

La causa dell'elevata variabilità tra tempo massimo e tempo minimo riscontrata è da attribuire alla complessità dei diversi pezzi. Pertanto per rendere migliore la stima abbiamo ipotizzato di moltiplicare il tempo medio di ogni singolo pezzo per un fatto-

re correttivo che tengo conto della complessità del pezzo (il coefficiente di complessità del pezzo verrà analizzato in seguito) . Quindi il tempo di formatura è ipotizzato seconda la seguente formula :

$$T_{formatura\ pezzo} = T_{medio} + T_{medio} \cdot Coefficiente_{complessità} \quad (3.1)$$

Nella tabella (3.16) sono riportati i valori dei tempi di formatura stimati:

<i>caso applicativo</i>	Peso (Kg)	Tmin (min)	Tmax (min)	Tmedio (min)	Complex	Tformatura (min)
Componente 1	0,07	1,5	30	7	53,49	<b>10,74</b>
Componente 2	0,49	2,5	30	8	24,9	<b>9,9</b>
Componente 3	0,59	2,5	30	8	50,12	<b>12</b>
Componente 4	2,9	2,5	30	15	47,00	<b>22</b>
Componente 5	16,96	15	30	22	54,05	<b>33,8</b>
Componente 6	0,79	2,5	30	8	58,65	<b>12,6</b>
Componente 7	23,68	15	30	26	12,79	<b>29,3</b>
Componente 8	7,08	3	30	20,3	60,68	<b>32,6</b>

Tabella 3.16 – Tempo formatura per ogni componente

Sommando i tempi di formatura stimati e i tempi di pulizia si calcola il costo della manodopera:

<i>caso applicativo</i>	Costo manodopera totale €
Componente 1	<b>0,64</b>
Componente 2	<b>3,29</b>
Componente 3	<b>3,95</b>
Componente 4	<b>7,30</b>
Componente 5	<b>11,67</b>
Componente 6	<b>4,18</b>
Componente 7	<b>10,56</b>
Componente 8	<b>10,82</b>

Tabella 3.17 – Costo totale della manodopera

### 3.3 Costo energetico

Per il costo energetico legato all'uso del forno fusorio è stata usata la formula (2.12). Il costo energetico del forno considera solo il costo del calore teorico di fusione della quantità di lega che comprende il getto, le materozze e il canale di colata. Allo stato attuale non sono computati nel modello i costi di mantenimento della temperatura del forno nel tempo, i costi di manutenzione e di manodopera degli addetti al forno, contributi che nel software Metal One di Eca Consult sono invece computati. Tale costo è naturalmente legato al costo del Kwh industriale che è stato stimato  $0,166 \frac{\text{€}}{\text{KWh}}$  grazie alla consulenza di Eca Consult. Il consumo energetico del forno varia a secondo della lega utilizzata e della tipologia del forno.

Per quanto riguarda l'Alluminio A356 sono stati ricavati alcuni dati tecnici elencati nella tabella (3.18):

Tipologia forno	Forno ad induzione
Efficienza energetica del forno (%)	70
Fattore perdita metallo	1,05
C unità energia ( $\frac{\text{€}}{\text{Kwh}}$ )	0,166
Calore specifico stato solido ( $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$ )	0,992
Temperatura fusione ( $^\circ\text{C}$ )	780
Calore latente di fusione ( $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$ )	395
Calore specifico stato liquido ( $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$ )	1,6364
Temperatura colata ( $^\circ\text{C}$ )	750

Tabella 3.18 - Dati termo-fisici dell'alluminio A356

Ipotizzando una temperatura ambiente di 25° C è stato calcolato il costo energetico per la realizzazione dei singoli casi applicativi:

Costo energia			
<i>caso applicativo</i>	Vgetto (dm <sup>3</sup> )	Temperatura Amb. (°C)	Totale €
Componente 1	0,027	25	<b>0,06</b>
Componente 2	0,187	25	<b>0,14</b>
Componente 3	0,224	25	<b>0,17</b>
Componente 4	1,089	25	<b>0,86</b>
Componente 5	6,361	25	<b>5,07</b>
Componente 6	0,298	25	<b>0,23</b>
Componente 7	8,88	25	<b>7,07</b>
Componente 8	2,65	25	<b>2,11</b>

Tabella 3.19 - Costo energetico

Di seguito verrà analizzata l'incidenza energetica definita come rapporto tra il costo dell'energia e la somma dei costi della lega e dell'energia stessa:

$$Incidenza\ energetica = \frac{Costo\ energia}{Costo\ energia + Costo\ lega} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Con i costi calcolati precedentemente l'incidenza energetica è pari al 12,4 %.

Analizzando un caso di analisi reale dal software Metal One è stato constatato che l'incidenza energetica di una specifica fonderia di ghisa è pari al 37,7%.

La differenza percentuale tra le due incidenze è giustificata dalla mancanza allo stato attuale nelle formulazione del costo di mantenimento in temperatura, costi di ammortamento dell'installazione dei forni, costi di manutenzione e costi di manodopera degli addetti ai forni. Inoltre ai fini operativi sarà opportuno tenere conto nella formulazione anche di un coefficiente di utilizzo del forno data la capacità di quest'ultimo.

### 3.3.1 Variazioni dell'incidenza energetica al variare della lega

Andremo adesso ad analizzare come possa variare il calore teorico di fusione cambiando la lega. Oltre all'alluminio A356 andremo ad analizzare una Ghisa grigia e il Bronzo:

#### Ghisa grigia Fe – C

Per quanto riguarda la composizione chimica della ghisa grigia analizzata, di seguito sono riportate le percentuali dei vari elementi :

Fe - C	Composizione chimica									
	C	Cr	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	P	S	Si
	3,73	0,95	91,9	<0,002	0,66	0,59	0,19	0,09	0,032	1,89

Tabella 3.20 - Composizione chimica ghisa grigia

Ipotizzando l'utilizzo della stessa tipologia di forno con lo stessa efficienza energetica, nella tabella (3.21) sono riportati i dati termo-fisici della ghisa grigia:

Tipologia forno	Forno ad induzione
Efficienza energetica del forno (%)	70
Fattore perdita metallo	1,1
C unità energia (€/Kwh)	0,166
Calore specifico stato solido (KJ/Kg °C)	0,49
Temperatura fusione (°C)	1176
Calore latente di fusione (KJ/Kg)	350
Calore specifico stato liquido (KJ/Kg °C)	0,95
Temperatura colata (°C)	1000

Tabella 3.21 - Dati termo-fisici della ghisa grigia

### Bronzo Cu – Al

Per quanto riguarda la composizione chimica del bronzo, nella tabella (3.22) sono riportate le percentuali dei vari elementi :

Cu - Al	Composizione chimica				
	Al	Cu	Fe	Mn	Ni
	9,7	80,5	4,6	0,64	4,6

Tabella 3.22 - Composizione chimica del bronzo

Ipotizzando l'utilizzo della stessa tipologia di forno con lo stessa efficienza energetica, nella tabella (3.23) sono riportati i dati termo-fisici del bronzo:

Tipologia forno	Forno ad induzione
Efficienza energetica del forno (%)	70
Fattore perdita metallo	1,1
C unità energia (€/Kwh)	0,166
Calore specifico stato solido (KJ/Kg °C)	0,44
Temperatura fusione (°C)	1070
Calore latente di fusione (KJ/Kg)	340
Calore specifico stato liquido (KJ/Kg °C)	0,58
Temperatura colata (°C)	950

Tabella 3.23 - Dati termo-fisici del bronzo

Adesso andremo a confrontare i costi del calore teorico di fusione cercando di capire quanto possano incidere le variabili termo-fisiche dei materiali:

<i>Caso applicativo</i>	Costo energetico Alluminio €	Costo energetico Ghisa Grigia €	Costo energetico Bronzo €
Componente 1	0,0655	0,0664	0,0663
Componente 2	0,1496	0,1515	0,1515
Componente 3	0,1793	0,1819	0,1818
Componente 4	0,8685	0,8815	0,8811
Componente 5	5,0701	5,1467	5,1434
Componente 6	0,2382	0,2418	0,2416
Componente 7	7,0781	7,1847	7,1802
Componente 8	2,1169	2,1486	2,1472
<b>Incremento % rispetto all'alluminio</b>		<b>+ 1,48 %</b>	<b>+ 1,42 %</b>

*Tabella 3.24 – incremento costo energetico per le diverse leghe*

La variazione del costo rispetto all'alluminio è sotto il 2% per le leghe prese in considerazione. C'è da precisare però che oltre a tale incremento ci sarà un sostanziale incremento anche per il mantenimento dei forni a temperature di esercizio più alte rispetto a quelle dell'alluminio: Tale contributo pur non ancora approfondito avrà una rilevanza nei costi.

### 3.4 Costo delle attrezzature

Tenenendo conto dei parametri geometrici dei singoli casi e applicando il modello analizzato nel capitolo precedente è stato stimato il costo delle attrezzature per ogni pezzo. Il costo delle attrezzature è strettamente legato al costo della lavorazione per l'attrezzaggio del parallelepipedo secondo tale formula:

$$C_{attrezzature} = \frac{C_{parallelepipedo} \cdot C_{complessità}}{Q} \quad (3.3)$$

Per quanto riguarda il costo di lavorazione del parallelepipedo base  $C_{parallelepipedo}$  in letteratura viene ipotizzato un valore pari a 1000 Rupie Indiane pari a circa 13 €. Il prezzo di mercato però nella realtà italiana è nettamente più alto per quanto riguarda le lavorazioni delle attrezzature.

Da un'indagine di mercato la realizzazione del parallelepipedo è stata intorno ai 322 Euro secondo la tabella (3.25):

<i>Voci di costo</i>	<b>Costo €</b>
Placche in stratificato di maggio	€ 50,00
Boccole guida in acciaio per placche	€ 40,00
Varie (viti, battistaffa , vernice)	€ 30,00
Manodopera	€ 72,00
Modellazione 3d e CAM	€ 40,00
Lavorazione con macchine C.N.	€ 50,00
Tavole di resina alta densità x modello	€ 10,00
Incollaggio tasselli in resina su placche prima della lavorazione + finitura modelli dopo lavorazione	€ 40,00
<b>Totale</b>	<b>€ 332,00</b>

*Tabella 3.25 – Costo totale realizzazione parallelepipedo*

Inoltre tale costo è stato ammortizzato per un numero d'ordine ipotizzato di 10.000 pezzi.

Riportiamo in tabella (3.26) il calcolo del rapporto di volume secondo la formula (2.12):

Rapporto volume $C_{PR}$			
<i>caso applicativo</i>	Vgetto (dm <sup>3</sup> )	Volume box selezione (dm <sup>3</sup> )	Rapporto volume $C_{PR}$
Componente 1	0,027	0,11	<b>0,76</b>
Componente 2	0,187	60,01	<b>0,99</b>
Componente 3	0,224	0,52	<b>0,56</b>
Componente 4	1,089	2,88	<b>0,62</b>
Componente 5	6,361	28,55	<b>0,77</b>
Componente 6	0,298	1,26	<b>0,76</b>
Componente 7	8,88	9,58	<b>0,073</b>
Componente 8	2,65	8,45	<b>0,68</b>

Tabella 3.26 - Rapporto volume

Di seguito il calcolo del rapporto di superfici e complessità delle anime secondo le formule (2.13) e (2.14):

<i>caso applicativo</i>	Rapporto superfici $C_{AR}$		Complessità n°anime $C_{NC}$		
	Area getto (dm <sup>2</sup> )	Area equivalente sfera (dm <sup>2</sup> )	Rapporto superficie $C_{AR}$	Numero anime	Complessità Anima $C_{NC}$
Componente 1	1,11	0,96	<b>0,13</b>	1	<b>0,292</b>
Componente 2	6,74	5,75	<b>0,14</b>	0	0
Componente 3	19229,1	2,34	<b>0,99</b>	2	0,42
Componente 4	11,13	5,11	<b>0,54</b>	2	<b>0,42</b>
Componente 5	71,96	16,58	<b>0,76</b>	1	<b>0,29</b>
Componente 6	10,67	2,16	<b>0,79</b>	3	<b>0,5</b>
Componente 7	40,88	39,88	<b>0,02</b>	0	<b>0</b>
Componente 8	44,77	10,01	<b>0,77</b>	6	<b>0,62</b>

Tabella 3.27 - Rapporto superficie e complessità anime

Il calcolo del rapporto del volume delle anime e dello spessore secondo le formule (2.15) e (2.16) è il seguente:

<i>caso applicativo</i>	Rapporto volume anime		Rapporto spessore		
	Somma Volume anime (dm <sup>3</sup> )	Rapporto volume anime $C_{CR}$	Spessore massimo (mm)	Spessore minimo (mm)	Rapporto spessore $C_{TR}$
Componente 1	0,09	<b>0,81</b>	60	25	<b>0,58</b>
Componente 2	0	<b>0</b>	50	8	<b>0,84</b>
Componente 3	0,05	<b>0,11</b>	1	1	<b>0</b>
Componente 4	0,58	<b>0,21</b>	120	30	<b>0,75</b>
Componente 5	10,03	<b>0,35</b>	270	22	<b>0,9</b>
Componente 6	0,3	<b>0,24</b>	135	3	<b>0,97</b>
Componente 7	0	<b>0</b>	400	60	<b>0,85</b>
Componente 8	1,91	<b>0,22</b>	284	8	<b>0,97</b>

Tabella 3.28 - Rapporto volume anime e rapporto spessore

Infine in tabella (3.29) è stato calcolato il rapporto di profondità secondo la formula (2.17):

<i>caso applicativo</i>	Rapporto profondità $C_{DR}$				
	L (mm)	W (mm)	H (mm)	Draw distance	Rapporto profondità $C_{DR}$
Componente 1	50	70	60	25	<b>0,1</b>
Componente 2	245	130	70	35	<b>0</b>
Componente 3	50	80	50	25	<b>0</b>
Componente 4	200	150	100	50	<b>0</b>
Componente 5	312	285	270	135	<b>0</b>
Componente 6	190	120	85	55	<b>0,22</b>
Componente 7	400	250	200	100	<b>0</b>
Componente 8	230	200	155	77,5	<b>0</b>

Tabella 3.29- Rapporto profondità

Tenendo presente la formula (2.20) è possibile stimare il prezzo totale di realizzazione delle attrezzature e il prezzo per il singolo pezzo ipotizzando un ordine di 10000 pezzi.

Costo delle attrezzature									
<i>caso applicativo</i>	$C_{PR}$	$C_{AR}$	$C_{NC}$	$C_{CR}$	$C_{TR}$	$C_{DR}$	Comple	Tot. €	€/pz
Comp. 1	0,76	0,13	0,29	0,81	0,58	0,1	53,49	<b>17225</b>	<b>1,72</b>
Comp. 2	0,99	0,14	0,62	0,92	0,84	0	24,9	<b>8020</b>	<b>0,80</b>
Comp. 3	0,56	0,99	0,29	0,10	0	0	50,12	<b>16139</b>	<b>1,61</b>
Comp. 4	0,62	0,54	0,42	0,20	0,75	0	47,00	<b>15134</b>	<b>1,51</b>
Comp. 5	0,77	0,76	0,29	0,35	0,91	0	54,0	<b>17406</b>	<b>1,74</b>
Comp. 6	0,76	0,79	0,5	0,24	0,97	0,2	58,65	<b>18885</b>	<b>1,88</b>
Comp. 7	0,07	0,02	0	0	0,85	0	12,79	<b>4119</b>	<b>0,41</b>
Comp. 8	0,68	0,77	0,62	0,22	0,97	0	60,68	<b>19541</b>	<b>1,95</b>

Tabella 3.30 - Costo delle attrezzature

Il costo delle attrezzature varia tra un minimo di 4119 Euro e un massimo di 19541 Euro:

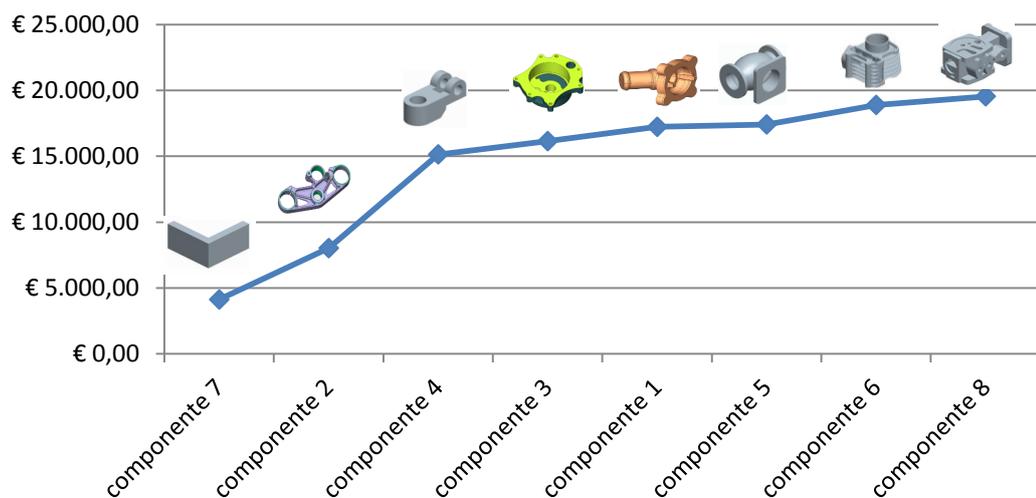


Figura 3.7 – Andamento del costo delle attrezzature

### 3.5 Costo totale

Considerando un ordine d'acquisto di 10000 pezzi, sono stati sommati tutti i contributi precedentemente calcolati per stimare il costo totale dei componenti riportati nella tabella (3.31):

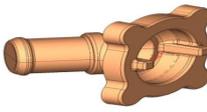
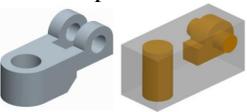
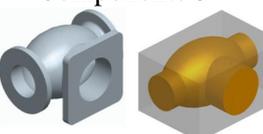
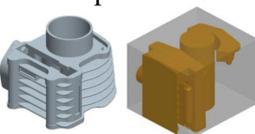
<i>caso applicativo</i>	Costo materiale	Costo manodopera	Costo energia	Costo attrezzature	Costo totale €
Componente 1 	0,52	0,64	0,06	0,80	<b>2,96</b>
Componente 2 	1,37	3,29	0,14	0,37	<b>5,62</b>
Componente 3 	1,50	3,95	0,17	0,75	<b>7,25</b>
Componente 4 	6,51	7,30	0,86	0,70	<b>16,20</b>
Componente 5 	38,52	11,67	5,07	0,81	<b>57,01</b>
Componente 6 	2,09	4,18	0,23	0,87	<b>8,39</b>
Componente 7 	50,57	10,56	7,07	0,19	<b>68,63</b>
Componente 8 	15,44	10,82	2,11	0,91	<b>30,33</b>

Tabella 3.31 - Costo totale dei casi applicativi

Nei costi totali non sono stati inseriti le finiture (2.20 e 2.21) in quanto molte fonderie lasciano a terzi le lavorazioni di finitura. Di seguito sono stati rappresentati graficamente i costi totali per una migliore lettura dei risultati:

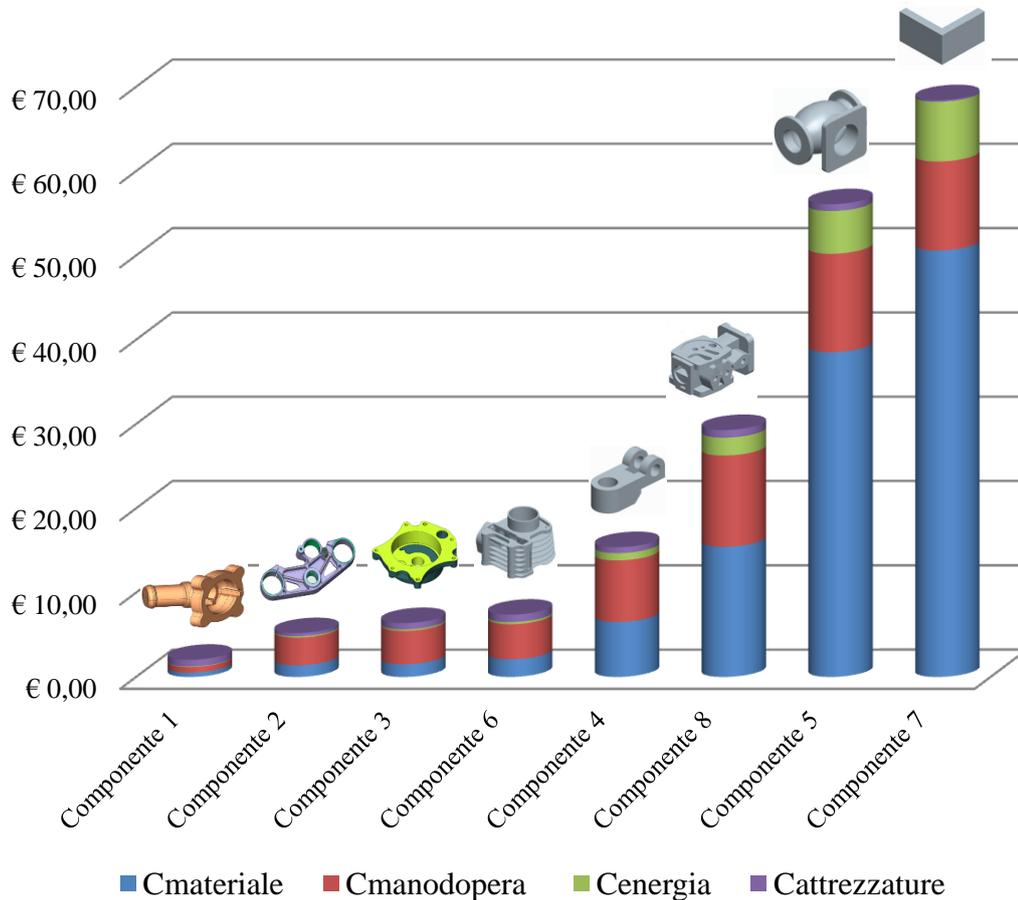


Figura 3.8 - Costi totali dei casi applicativi

Per approfondire e analizzare l'incidenza che ogni singolo contributo ha sul totale, andremo ad analizzare le percentuali di incidenza dei contributi su ogni singolo pezzo per poi andare a fare una media.

**Componente 1**

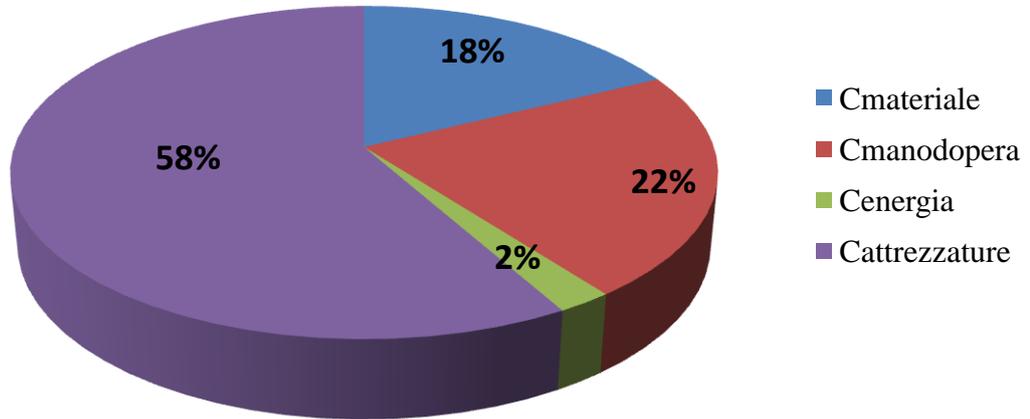
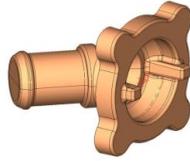


Figura 3.9 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 1

**Componente 2**

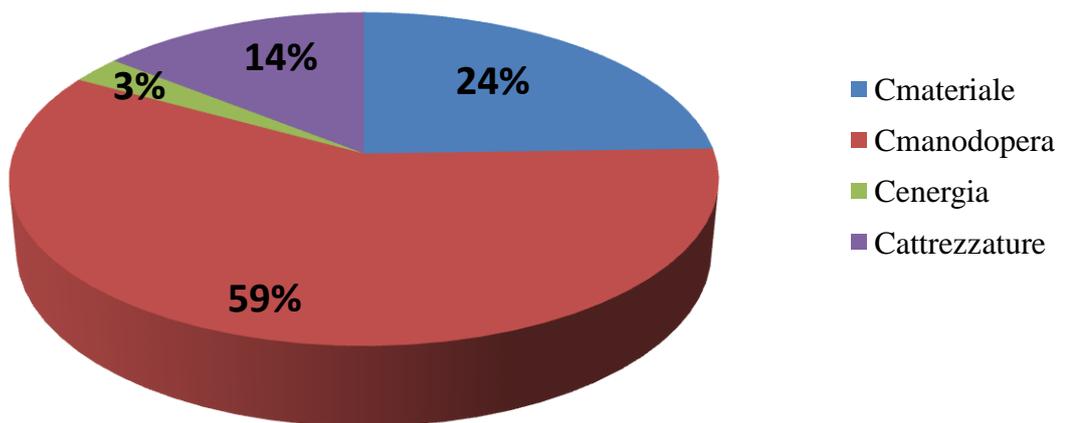


Figura 3.10 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 2

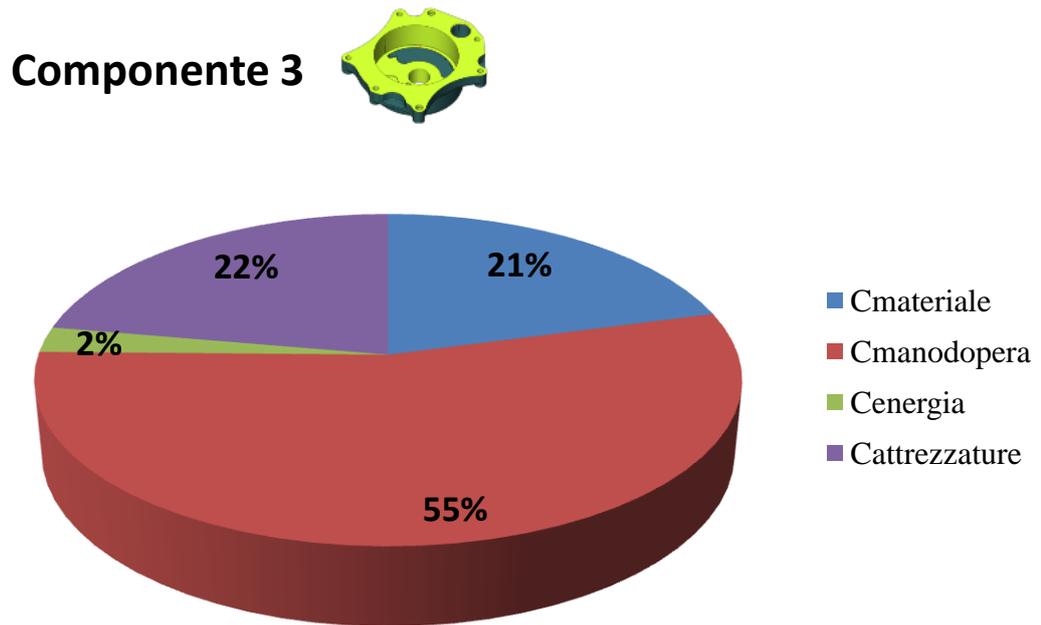


Figura 3.11 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 3

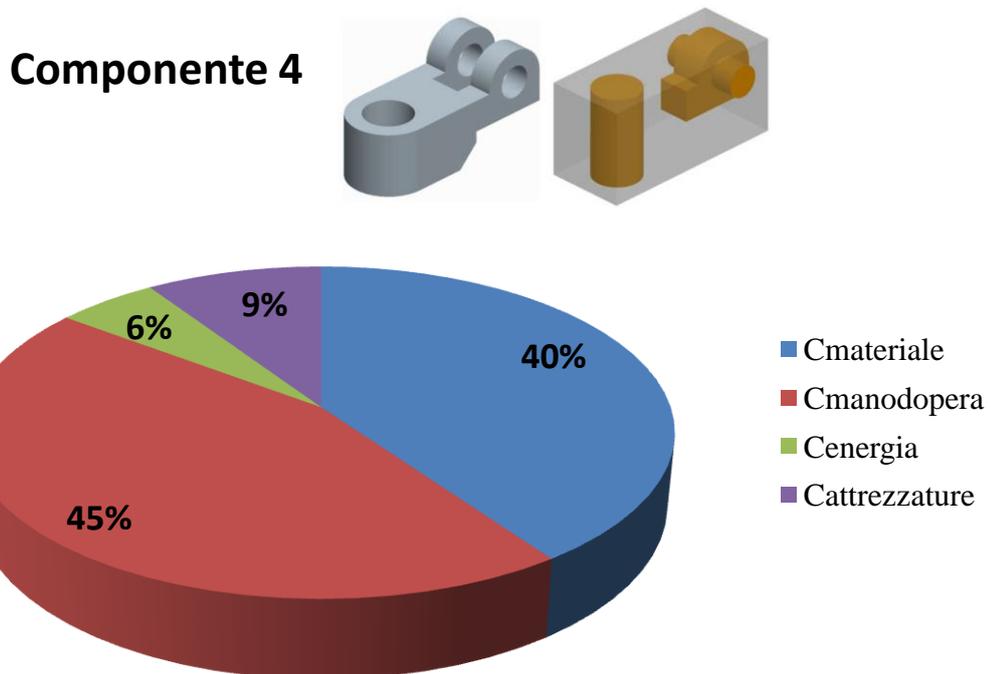


Figura 3.12 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 4

**Componente 5**

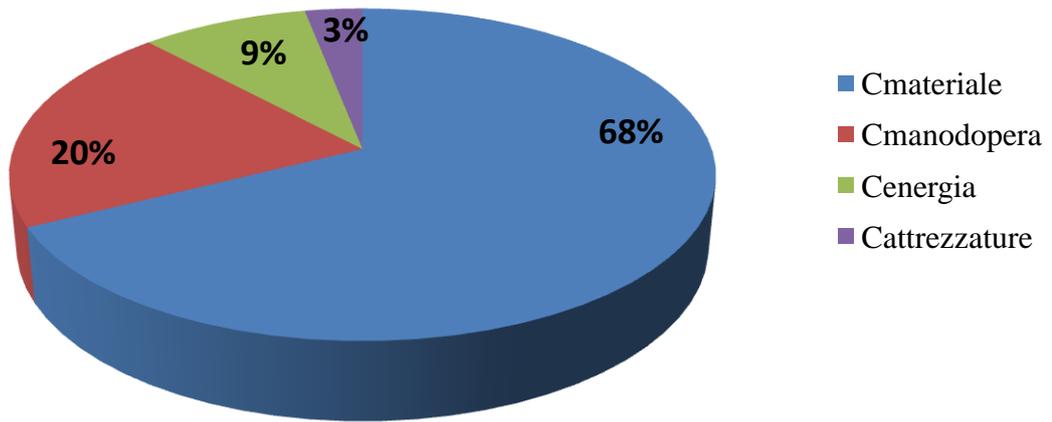
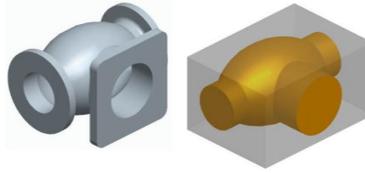


Figura 3.13 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 5

**Componente 6**

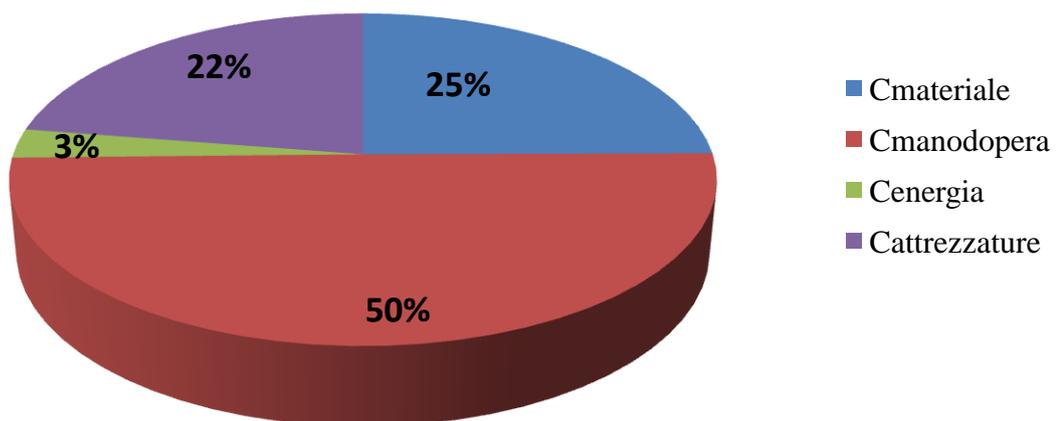
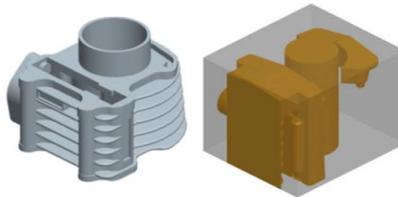


Figura 3.14 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 6

### Componente 7

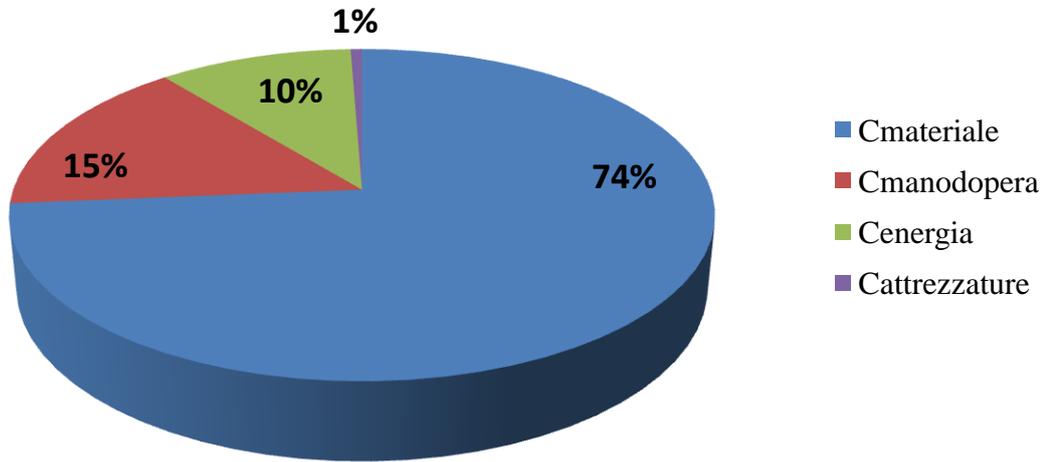
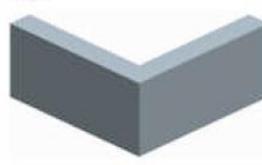


Figura 3.15 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 7

### Componente 8

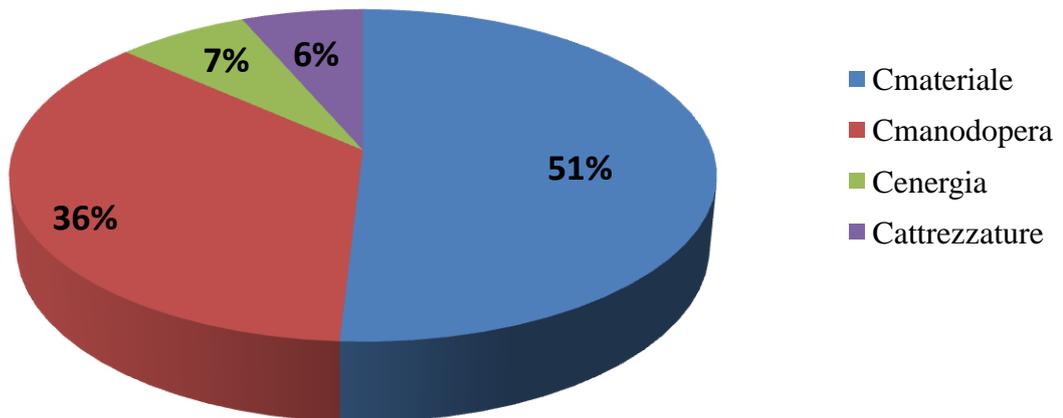


Figura 3.16 - Percentuale incidenza contributi sul costo totale del componente 8

Dopo aver analizzato singolarmente tutti i casi applicativi, è possibile fare la media tra i pezzi per vedere l'incidenza che ogni contributo di costo ha sul totale.

Di seguito è rappresentata l'incidenza dei contributi nel grafico:

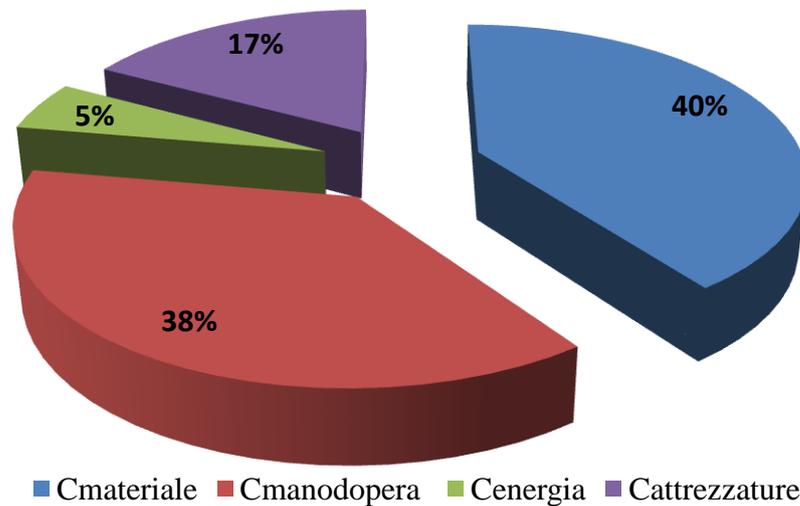


Figura 3.17 - Incidenza media dei singoli contributi sul costo totale

Il contributo maggiore è dato dal costo del materiale, seguito dalle attrezzature, poi dalla manodopera e in ultimo il costo energetico.

Procederemo con un'analisi sulla proporzionalità tra volume e costo e successivamente tra coefficiente di complessità e costo.

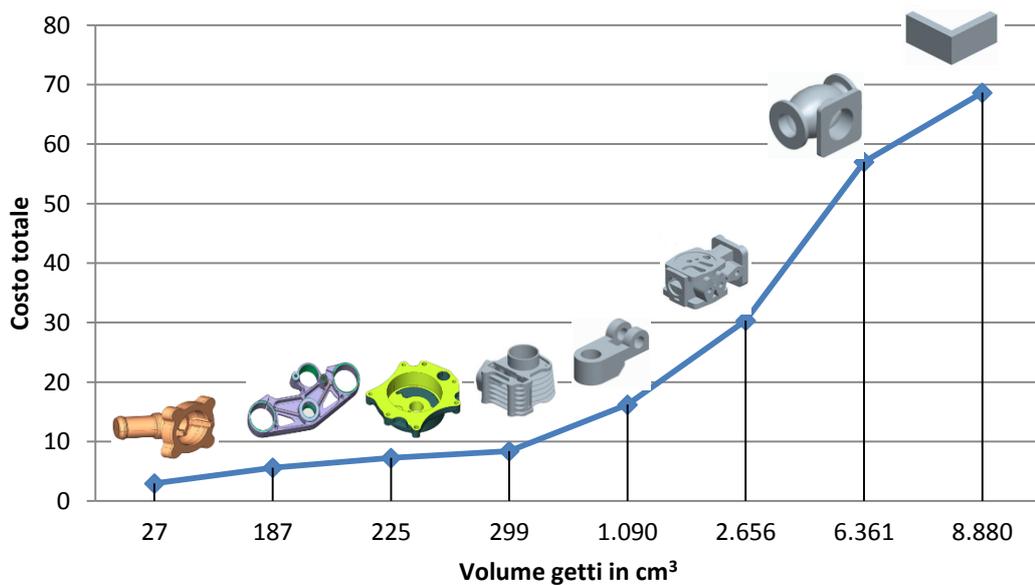


Figura 3.18 - Grafico costo totale / volume dei getti

Dal grafico è visibile un andamento proporzionale tra volume e costo totale. Per quanto riguarda il coefficiente di complessità andremo a graficare il costo totale in funzione di tale coefficiente:

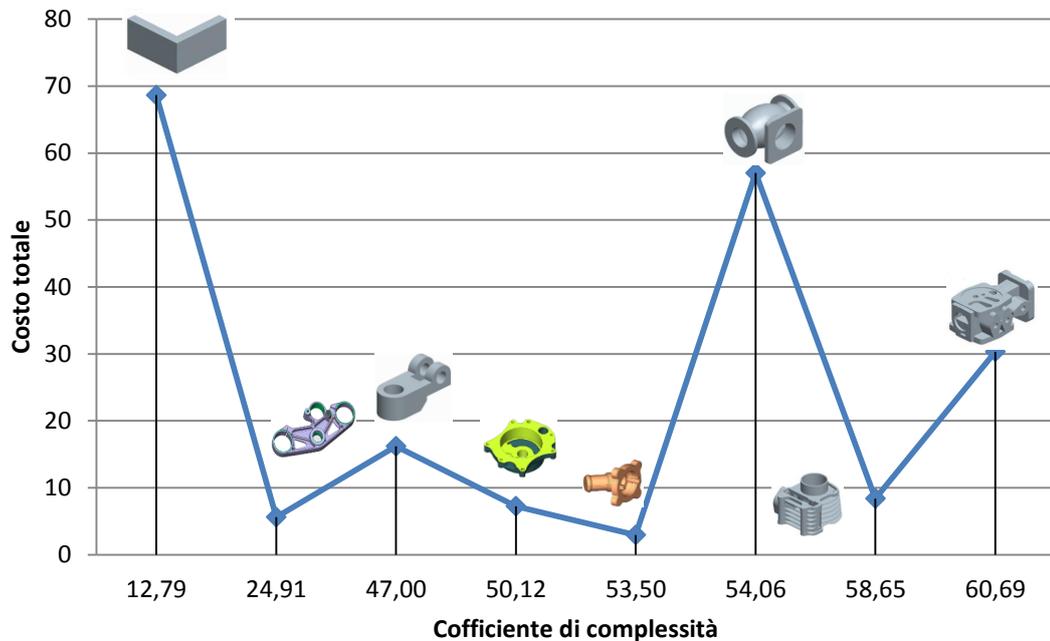


Figura 3.19 - Grafico costo totale / coefficiente di complessità

La lettura del grafico inizialmente sembra escludere una proporzionalità tra coefficiente di complessità e costo. La mancata proporzionalità è giustificata dai volumi dei pezzi che hanno ordini di grandezza nettamente diversi tra loro e che rendono poco rappresentativo il confronto. Infatti il pezzo 7, pur avendo il coefficiente di complessità più basso ha un volume otto volte più grande rispetto alla maggior parte degli altri pezzi.

Pertanto per verificare tale proporzionalità è opportuno tenere conto solo di classi di pezzi con ordini di grandezza uguali. Esamineremo quindi solo il pezzo 2 con volume  $0,187 \text{ dm}^3$ , il pezzo 3 con volume  $0,224 \text{ dm}^3$  e il pezzo 6 con volume  $0,298 \text{ dm}^3$ .

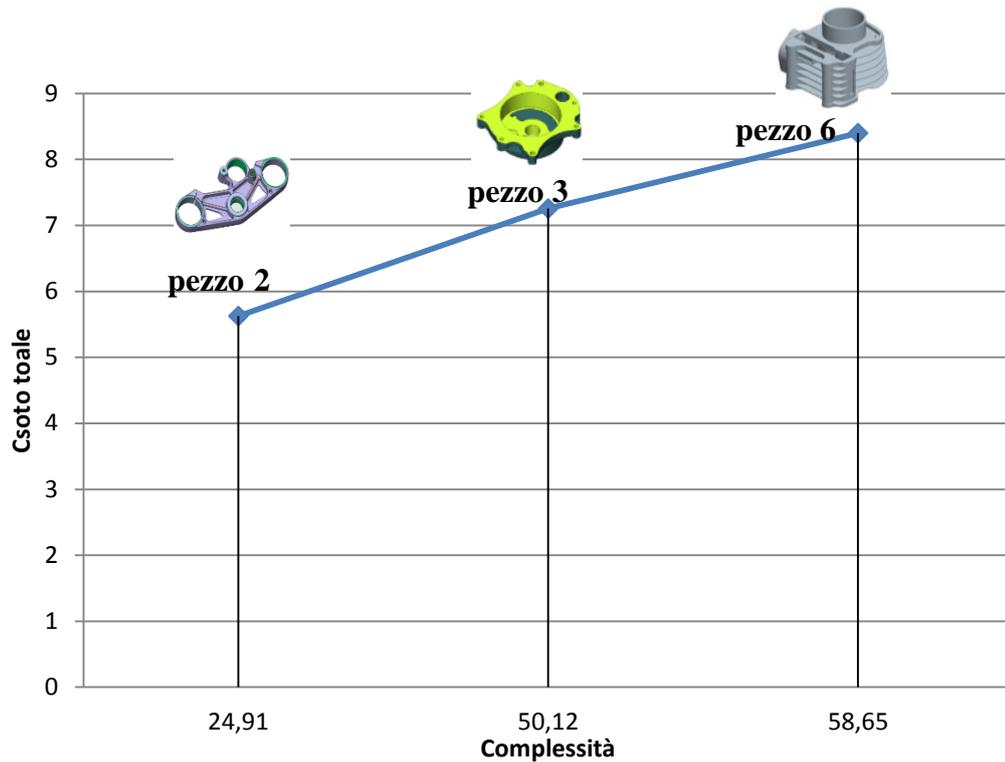


Figura 3.20 - Grafico costo totale / coefficiente di complessità per pezzi con volume dello stesso ordine di grandezza

Come si può notare dal grafico nel caso in cui si abbia un ordine di grandezza uguale tra i pezzi vi è un aumento dei costi direttamente proporzionale all'aumento del coefficiente di complessità geometrico del pezzo.

### 3.6 Ipotesi di realizzazione per grappoli dei componenti

Nell'analisi dei costi fino ad ora fatta, abbiamo ipotizzato la realizzazione di un singolo componente. Ipotizzando di realizzare i componenti in grappoli andremo a verificare la variazione dei costi finale. Non tutti i casi applicativi hanno le dimensioni e le forme adeguate per la produzione in grappoli, analizzeremo solo nel dettaglio i componenti 1 , 2 , 3 ipotizzando un numero di pezzi come descritto nella tabella (3.32):

<i>Componente</i>		Numero pezzi
Componente 1		<b>2</b>
Componente 2		<b>2</b>
Componente 3		<b>4</b>

Tabella 3.32 – Numero pezzi per grappolo

Per quanto riguarda il costo del materiale abbiamo ipotizzato che ogni pezzo comporti l'aumento del 5% del volume del sistema di colata, ovvero nell'ipotesi precedente avevamo ipotizzato che il volume del sistema di colata fosse il 20% del volume del getto, mentre adesso ipotizziamo che il volume del sistema di colata sia il 25% del volume del getto per i componenti 1 e 2 e il 40% per il componente 3. Per quanto riguarda il box di formatura con staffe UNI per i 3 componenti, è stato verificato che il box potesse dimensionalmente contenere il nuovo volume del grappolo. Il volume delle anime è stato semplicemente considerato come il volume del singolo componente moltiplicato per il numero di pezzi per grappolo.

Di seguito nella tabella (3.33) riporteremo in tabella il costo del materiale per i 3 grappoli totale:

<i>caso applicativo</i>	Costo totale del materiale			<b>Totale €</b>
	Costo totale della lega	Costo totale sabbia per lo stampo	Costo totale sabbia per le anime	
Grappolo componente 1	0,30	0,13	0,19	<b>0,63</b>
Grappolo componente 2	1,04	0,14	0	<b>1,19</b>
Grappolo componente 3	1,25	0,051	0,005	<b>1,31</b>

Tabella 3.33 – costo del materiale per i grappoli

Per quanto riguarda il costo di manodopera, energetico e delle attrezzature ( con l'ipotesi di un ordine di 10000 pezzi ) è stato calcolato il costo con le ipotesi precedentemente fatte, il costo del grappolo dei componenti è riportato nella tabella (3.34):

<i>caso applicativo</i>	Costo grappolo			
	Costo materiale	Costo manodopera	Costo energia	Costo attrezzature
Grappolo componente 1	0,63	1,20	0,11	1,7
Grappolo componente 2	1,19	6,38	0,24	0,8
Grappolo componente 3	1,31	15,04	0,57	1,61

Tabella 3.34 – Costo dei singoli contributi del grappolo

Il costo totale è dato dalla somma dei singoli contributi calcolati nella tabella sopra descritta. Il costo totale del grappolo verrà poi diviso nel numero di pezzi di ogni grappolo. Per facilità di lettura poniamo nella tabella (3.35) a fianco del costo totale per grappoli anche il costo di realizzazione di un singolo pezzo:

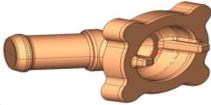
<i>caso applicativo</i>	Costo totale componente realizzato singolarmente	Costo totale componente realizzato per grappolo	Decremento percentuale del costo
Componente 1 	2,96	1,83	<b>- 38,1%</b>
Componente 2 	5,62	4,31	<b>- 23,3 %</b>
Componente 3 	7,25	4,63	<b>- 36,9%</b>

Tabella 3.35 – Costo totale componente realizzato per grappolo e singolarmente

Graficamente è possibile vedere come il costo del singolo pezzo diminuisce se prodotto in grappoli:

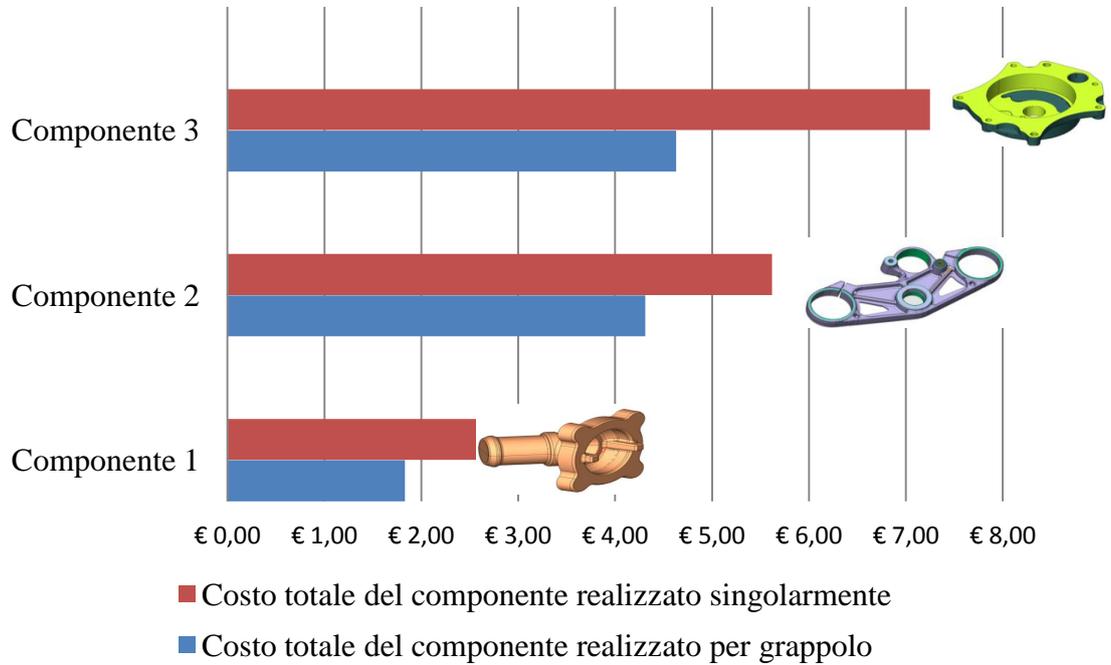


Figura 3.21 – Costo totale componente realizzato per grappolo e singolarmente

## Capitolo 4 Eca Consult

In questo capitolo verrà brevemente presentata *Ecaconsult* (Engineering Consulting Associated), azienda italiana nata nel 1993 da una maturata esperienza nell'ingegneria informatica e nell'organizzazione aziendale.

L'iniziale specializzazione nel settore delle fonderie a gravità di metalli ferrosi e non ferrosi è stata successivamente applicata alle fonderie di pressofusione fino all'estensione degli studi alle aziende di trasformazione della plastica.

### 4.1 Metal One

Il software di riferimento che analizzeremo è Metal One, una soluzione basata su SAP Business One per le Piccole e Medie Imprese operanti nei settori della metallurgia, ferrosa e non, e dei manufatti in metallo. METAL One permette di gestire l'intero flusso di processo delle Fonderie dalla prototipazione e preventivazione, ai dati tecnici qualitativi e di processo delle fusioni, al ciclo attivo e passivo, alla pianificazione della produzione, al conto lavoro, alla logistica, al controllo qualità, all'amministrazione e controllo di gestione le informazioni relative alla lega, ai pesi medi e pesi lordi, permette una corretta gestione di pianificazione e di magazzino. Le articolate attrezzature di Fonderia (modelli, staffe, casse anima) sono gestite sotto il profilo tecnico, qualitativo e amministrativo. Il nucleo centrale di METAL One permette una completa gestione dei dati tecnici dei modelli e stampi. La definizione del ciclo e fasi di lavoro, permette una integrata gestione della produzione e dell'analisi costi.

## 4.2 Struttura dei costi a livello preventivo di Metal One

La gestione dei costi a livello preventivo si può ottenere un costo complessivo, ovvero un costo complessivo sia dei costi diretti che Indiretti. Per costi diretti si intendono tutti i costi di cui si è in grado di effettuare una rilevazione diretta sul getto e che sono raccolti nella scheda modello (lega, anime, lavorazioni esterne, materiali ausiliari, tempi di lavoro di ciclo). Per costi indiretti si intendono tutti gli altri costi aziendali, che non potendo essere rilevati direttamente, vengono raccolti nei centri di costo per poi essere ribaltati sulle fusioni. La logica con cui i costi indiretti vengono ribaltati sul getto è quella che man mano una fusione transita da un reparto ne assorbe i relativi costi in base al criterio di ribaltamento scelto (Kg o tempo o altro). Si riporta di seguito lo schema che esemplifica il concetto:

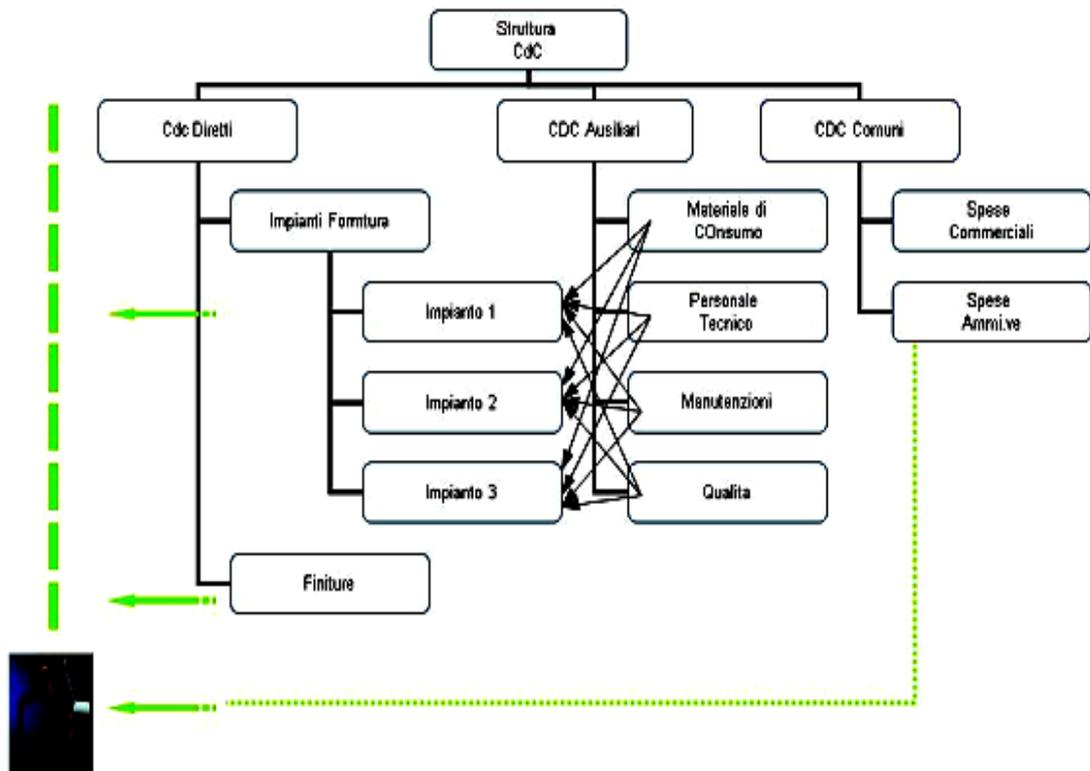


Figura 4.1 – Struttura centro dei costi

Come si vede nella tabella (4.1), nei vari Centri di Costo sono raccolti tutti i Costi indiretti i quali vengono attribuiti alla fusione in base al ciclo di lavoro di quest'ultima:

Livello	Descrizione
<b>1</b>	Centro dei costi diretti
<b>2</b>	Formatura manuale
<b>2</b>	Impianto automatico
<b>2</b>	Molatura
<b>2</b>	Sabbiatura / scassettatura
<b>2</b>	Riparazione e saldatura
<b>2</b>	Trattamento termico
<b>3</b>	Tempra
<b>3</b>	Distorsione
<b>1</b>	Centro dei costi getto
<b>2</b>	Leghe
<b>3</b>	Materie prime
<b>3</b>	Forno fusori
<b>4</b>	Tipologia forno A
<b>4</b>	Tipologia forno B
<b>2</b>	Anime
<b>2</b>	Materiale ausiliare
<b>2</b>	Lavorazioni esterne

*Tabella 4.1 – Centri dei costi*

Il Centri dei costi sono suddivisi in 5 gruppi:

1. Il Gruppo A: raccoglie i costi Indiretti dei reparti produttivi;
2. Il Gruppo B: raccoglie i costi Indiretti dei reparti ausiliari ai reparti produttivi;
3. Il Gruppo C: raccoglie i costi Indiretti amministrativi, commerciali e generali;
4. Il Gruppo D: raccoglie i costi Diretti che sono direttamente inseriti nella scheda modello
5. Il Gruppo E: raccoglie i costi relativi ai prodotti commerciali

### 4.2.1 Criteri utilizzati per il calcolo dei costi dei getti

Per il calcolo dei costi di ogni singolo getto prodotto è dato dalla somma dei costi diretti e dei costi indiretti come si può vedere nella figura seguente:

The screenshot shows the 'Modelli' window with the following data:

- Modello: CNH.0503 | FUS.ALL.COD. 2013.05.49
- Cliente: C00002 | Officina di Precisione Srl
- Codice Articolo: C0000200001

Navigation tabs: Scheda tecnica, Indici di Modifica, Attrezzatura, Autorizz., Listini, Ciclo, Costi, Allegati.

Sub-tabs: Costi Indiretti, Costo Getto, Conto Scalare.

Cost Data:

- Cod. Ciclo: A0 | Ciclo Gravita Automatico
- Costi Diretti: 57,72448 EUR | 1,34243 EUR /Kg
- Scarto: 5,00 | 2,63822 EUR | 0,06135 EUR /Kg
- Costi Indiretti: 84,62212 EUR | 1,50284 EUR /Kg
- Totale Costi: 124,98282 EUR | 2,90858 EUR /Kg
- Utile: 0,00 EUR

Other Parameters:

- Lotto Economico: 100
- Lega: GHISA CR12%
- Impianto: Manuale
- Peso Medio: 43,00
- Peso Lordo: 58,00
- UM Vend.: Nr
- Numero Figure: 2
- Prezzo Vendita: EUR | Margine: %
- Prezzo Listino: EUR | Cambio: 1,000000

Buttons: Aggiornare, Interrompere

Figura 4.2 – Costi diretti e indiretti

I Costi Diretti vengono inseriti direttamente nella scheda modello e sono composti da:

#### 1) Anime

Sono inserite direttamente nella scheda modello:

The screenshot shows the 'Modelli' window with the 'Cassa Anima' detail view open. The main window shows the same model information as Figure 4.2.

**Modelli** Table:

#	Num. An.	Cassa Anima	Anima	Codice Miscel...	Stato	Peso	Prezzo	Fornitore
1	2	C0000200001C01	C0000200001A01	Shell	Presente	2,300	2,60000	
2	1	C0000200001C02	C0000200001A02	Shell	Non Ricevuto	1,500	0,00000	

**Dettaglio Cassa Anima** Form:

- Cassa Anima: C0000200001C01 | C.A. 1 FUS.ALL.COD. 2013.05.49
- Anima: C0000200001A01 | Anima 1 FUS.ALL.COD. 2013.05.49
- Miscela Formatura: Shell | Shell Moulding
- Peso Unitario: 2,30
- Lead Time: 0
- Tracciabilità Anima: Lotto
- Fornitore: [ ]
- Listino: [ ] | Prezzo Unitario: 0,00000
- Numero Figure per Anima: 1
- Numero Anime per Getto: 2
- Numero Getti per Anima: 1
- Stato: PRESENTE

Ultime Transazioni Table:

Azione	Tipo	Serie Doc.	Numero Doc.	Data Doc.	BP	Nr
ENTRATA	EM	MAGIN13	1300002	01.01.13		

Buttons: OK, Interrompere

Figura 4.3 – costo anime

## 2) Lega

Metal One calcola il costo della lega allo stato liquido, ovvero considerando le seguenti voci:

- Materie prime
- Calo fusione
- Energia Forni

#	Componente Lega	Descrizione comp...	Um Componente	Quantità Compon...	Listino	Costo Unitario	Costo Totale
F00009	Ferro Cromo Carburiz	Kg	7,00	Listino Fornitori	1,79000	12,53000	
F00010	Ferro Correttivo	Kg	51,50	Listino Fornitori	0,38300	19,72450	
F00011	Ferro Cromo Affinato	Kg	4,00	Listino Fornitori	2,44000	9,76000	
F00012	Rottame al Cromo 12%	Kg	37,50	Listino Fornitori	0,34000	12,75000	
F00013	Alluminio in Pani 99,7%	Kg	0,16	Listino Fornitori	2,35000	0,37600	
F00014	Ferro Titanio	Kg	0,10	Listino Fornitori	3,00000	0,30000	

Riepilogo per 100 Kg:		Valore	Progressivo
Costo Materiali		55,44050	55,44050
Costo Calo Fusione		2,91792	58,35842
Costo Incid. Energetica		33,96085	92,33927

Figura 4.4 - Costo della lega

Il costo complessivo della lega, è formato da:

- Materie prime (frutto di una composizione media utilizzata in reparto)
- Calo fusione
- Energia forni

Come viene calcolata l'Energia Forni.

Anzitutto si è utilizzato il criterio della % invece che un costo /Kg. Tale % è stata calcolata con la seguente formula:

$$Energia Forni = \frac{Costo forni (Dxx6+Dxx7)}{Costo forni+Costo materie prime (Dxx1)} \quad (4.1)$$

In base ai valori a Budget 2011 il calcolo dell'incidenza energetica deriva dalla seguente tabella:

Calcolo incidenza energetica	
Dxx6	Costo annuo in €
Dxx7	Costo annuo in €
Dxx1	Costo annuo in €
<b>Incidenza energetica %</b>	<b>36,76</b>

Tabella 4.2 - Calcolo incidenza energetica sul budget

### 3) Materiali Ausiliari

Inseriti direttamente nel ciclo del modello:

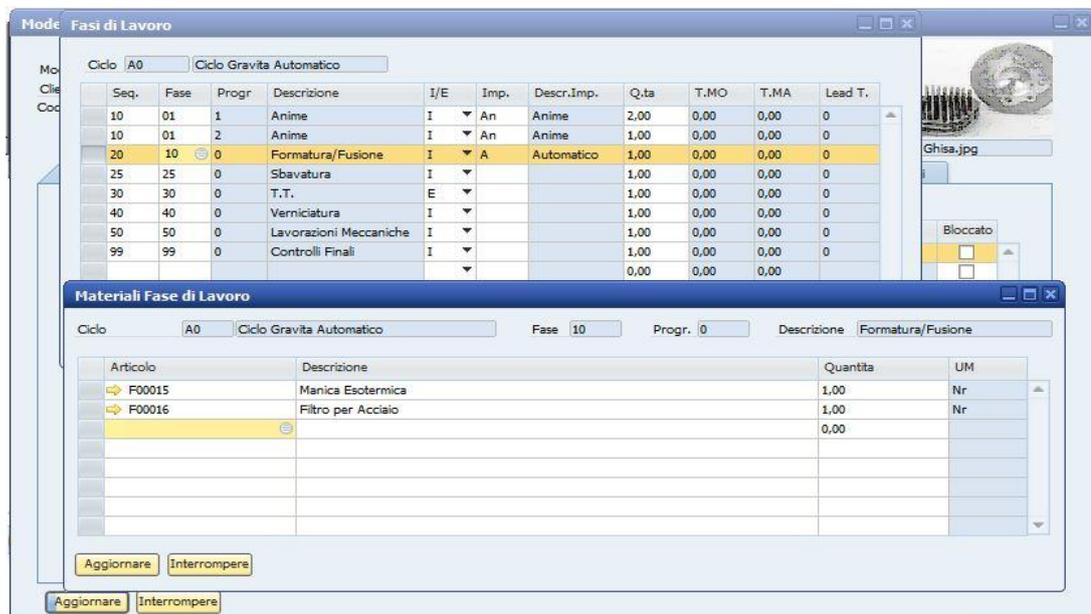


Figura 4.5 – Costo materiali ausiliari

### 4) Miscela di Formatura

Metal One calcola il volume di terra e quindi i Kg di terra necessari alla formatura. Per effettuare questo calcolo sono necessari una serie di dati che permetta il calcolo del volume, in particolare:

- 
- Il codice miscela
- Il peso Specifico della Terra, Lega e Miscela delle Anime
- Le dimensioni della staffa
- I Pesi medi e lordi del modello e delle anime

The screenshot shows the 'Modelli' software interface. At the top, there are input fields for 'Modello' (CNH.0503), 'FUS.ALL.COD.' (2013.05.49), 'Cliente' (C00002), and 'Officina di Precisione Srl'. Below this is a navigation bar with tabs: 'Scheda tecnica', 'Indici di Modifica', 'Attrezzatura', 'Autorizz.', 'Listini', 'Ciclo', 'Costi', and 'Allegati'. The 'Staffa' tab is active, showing a configuration area with 'Dimensione Placca' (600, 1000), 'Volume Mc.' (0,38000), and 'Kg. Miscela' (282,982). A table below lists intermediate steps:

	Numero	Altezza		Numero	Altezza
Intermedie 1	1	300	Intermedie 6		
Intermedie 2			Intermedie 7		
Intermedie 3			Intermedie 8		
Intermedie 4			Intermedie 9		
Intermedie 5			Intermedie 10		
			Inferiore	1	300

At the bottom of the window are 'Aggiornare' and 'Interrompere' buttons.

Figura 4.6 - dimensione staffa

### 5) Lavorazioni Esterne

Sono inserite nella Scheda Costi Esterni dei Modelli e nel Ciclo di Lavoro dei Modelli.

### 6) Mano d'opera

Per la fase di lavoro Molatura si inserisce il tempo uomo e macchina nel ciclo di lavoro.

### 4.2.2 Confronto tra la stima dei costi di Metal One e il modello proposto

Per verificare la validità dei risultati del nostro modello abbiamo simulato un preventivo dei casi applicativi da noi studiati con Metal One fornendo una serie di dati di input secondo la tabella (4.3):

<i>caso applicativo</i>	<i>peso medio Kg</i>	<i>peso lordo Kg</i>	<i>dimensioni staffa</i>	<i>miscela formatura <math>\frac{Kg}{dm^3}</math></i>	<i>n° anime</i>	<i>Peso totale anime (Kg)</i>	<i>tempi formatura (minuti)</i>	<i>tempi costruzione anime (minuti)</i>
Comp. 1	0,072	0,26	315 * 315 * 50	1,59	0	0,14	10,7	0
Comp. 2	0,49	1,79	315 * 315 * 80	1,59	0	88,08	13,7	0
Comp. 3	0,59	2,15	315 * 315 * 50	1,59	2	0,08	11,3	11
Comp. 4	2,9	10,46	315 * 315 * 100	1,59	2	0,92	22,1	10
Comp. 5	16,96	61,07	500 * 500 * 300	1,59	1	15,96	33,8	15
Comp. 6	0,79	2,86	500 * 500 * 300	1,59	3	0,49	12,6	16
Comp. 7	23,68	85,25	315 * 315 * 100	1,59	0	0	29,3	0
Comp. 8	7,08	25,49	315 * 315 * 160	1,59	6	3,03	32,6	30

Tabella 4.3 – Dati input Metal One

Il software ha così calcolato la stima dei costi come da tabella (4.4). È opportuno precisare che per quanto riguarda la stima dei tempi di costruzione delle anime, tema non ancora implementato nel modello proposto, sono stati riportati valori teorici secondo l'esperienza di addetti a tali operazioni. Per una migliore lettura a fianco riportiamo i valori dei costi del modello proposto:

<i>caso applicativo</i>	Costo Lega	Costo Miscela	Costo Manodopera	Costo Metal One	Costo modello proposto
Componente 1	0,21	1,54	0,64	<b>2,40</b>	<b>2,96</b>
Componente 2	1,46	2,31	3,29	<b>7,06</b>	<b>5,62</b>
Componente 3	1,75	1,32	3,95	<b>7,02</b>	<b>7,25</b>
Componente 4	8,64	1,91	7,3	<b>17,84</b>	<b>16,20</b>
Componente 5	50,53	16,56	11,67	<b>78,77</b>	<b>57,01</b>
Componente 6	2,35	2,81	4,18	<b>9,34</b>	<b>8,39</b>
Componente 7	70,56	13,68	10,56	<b>84,24</b>	<b>68,63</b>
Componente 8	21,09	2,01	10,82	<b>33,92</b>	<b>30,33</b>

Tabella 4.4 – Confronto stima dei costi tra Metal One e modello proposto

Dall'analisi della tabella si nota che i costi di Metal One hanno uno scarto tra il -10% e il +16% rispetto ai costi stimati dal modello proposto. Tale scarto è giustificato da una serie di voci di costo aggiuntive che Metal One considera rispetto al modello proposto come è possibile notare dalla tabella (4.5):

		Modello proposto	Metal One
Costo materiale	<i>Lega metallica</i>	✓	✓
	<i>Sabbia box formatura</i>	✓	✓
	<i>Anime</i>	✓	✓
	<i>Materiali isolanti</i>	✓	✓
Costo manodopera	<i>Formatura</i>	✓ *	✓ *
	<i>Costruzione anima</i>	✗	✓ *
	<i>Pulitura</i>	✓	✓ *
	<i>Addetti reparti ausiliari</i>	✗	✓
Costo energia	<i>Calore fusione</i>	✓	✗
	<i>Ammortamento costo del forno</i>	✗	✓
	<i>Mantenimento forno a temperatura</i>	✗	✗
	<i>Fusione + Manutenzione forno + addetti al forno</i>	✗	✓ **
Costo attrez	<i>Stima in base alla geometria</i>	✓	✗
	<i>Realizzazione da terzi</i>	✗	✓

Tabella 4.5 – Confronto approccio Metal One – Modello proposto

- \* = necessitano in input dei tempi di realizzazione delle operazione,  
non vi è ancora un modello matematico di stima
  
- \*\* = il costo energetico di Metal One è dato dal totale dei costi del reparto forni  
che comprende costo di fusione, costo addetti al forno e manutenzione

## Capitolo 5 Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo quello di proporre un modello dei costi di processi fusori. Una buona stima dei costi ha un impatto diretto sull'impresa poiché una sovrastima può provocare la perdita di clienti, mentre una sottovalutazione può portare a gravi perdite economiche per l'impresa. A causa di questo ruolo delicato e cruciale in un'organizzazione, la stima dei costi è un punto fondamentale sia per le strategie progettuali e operative che per le politiche gestionali e decisionali dell'azienda. Dopo un'attenta indagine della letteratura, da cui è stata riscontrata un'esiguità di fonti, sono stati analizzati tre modelli rispettivamente dell'Università del Michigan, dell'Università di Pretoria e dell'Indian Institute of Technology. Quest'ultimo modello è stato assunto come punto di partenza per l'implementazione di un nuovo modello che tenesse conto di tutti i fattori di incidenza dei costi di produzione sul costo totale, ovvero, il costo del materiale, che comprende la lega metallica, la sabbia di formatura, le anime ed eventuali materiali isolanti, il costo della manodopera per le opere di formatura e pulizia del getto, il costo energetico per portare alla temperatura di fusione la lega metallica e il costo delle attrezzature inteso come costo di realizzazione di stampi, modelli, placche modello e casse d'anima. L'intento del modello proposto è quello di rendere il più possibile parametrizzabile la formulazione in modo da poterla adattare ai casi specifici. Nel modello è stata proposta la stima di un coefficiente di complessità geometrico del componente con l'intento di quantificare la complessità alla quale è inevitabilmente legato un aumento dei costi nella formatura, nella pulizia e nella realizzazione delle attrezzature.

Successivamente è stato simulato il costo totale di otto componenti forniti dall'Università di Bologna. Sono stati presi in considerazione le proprietà di ritiro di una lega d'Alluminio, un costo della manodopera secondo il rapporto sull'Industria delle fonderie e un costo del Kwh industriale secondo i dati disponibili in letteratura. Allo stato attuale non è stato possibile stimare la manodopera delle altre operazioni come le

operazioni degli addetti ai forni, i trasferimenti dei getti e la messa in funzione e la manutenzione delle macchine. Il costo energetico del forno è stato computato considerando solo il costo del calore teorico di fusione della quantità di lega che comprende il getto, le materozze e il canale di colata senza tener conto del costo di mantenimento in temperatura, dell'ammortamento dell'installazione dei forni, della manutenzione e della manodopera degli addetti ai forni. Inoltre il costo energetico dei forni rappresenta secondo alcune stime di Assofond (Associazione nazionale delle fonderie) il 55% del costo energetico complessivo ma dovranno essere implementate sotto il profilo energetico anche le altre attività ad alta intensità energetica come la realizzazione degli stampi e delle anime, la pulizia e la sbavatura ed eventuali trattamenti termici. Per quanto riguarda il costo delle attrezzature l'approccio usato servendosi di un coefficiente di complessità per parametrizzare la geometria può portare a buoni sviluppi se vi sarà la possibilità di formulare un coefficiente "tarato" sulla realtà produttiva italiana e su casi applicativi reali. I risultati ottenuti riguardo ai costi delle attrezzature per avere una validità dovranno essere contestualizzati in una specifica realtà data la variabilità di prezzo che le attrezzature hanno sul mercato. La collaborazione con Eca Consult ci ha permesso di analizzare il loro software Metal One, una soluzione basata su SAP Business One per le piccole e medie imprese operanti nei settori della metallurgia. Tale software ha un approccio di imputazione dei costi diverso rispetto a quello qui proposto, in quanto, conoscendo il costo totale dei singoli reparti e la produzione annua alloca uniformemente sul singolo pezzo contributi di costi diretti e indiretti che attualmente il modello proposto non è in grado di computare. Le criticità riscontrate nell'elaborazione del modello riguardano principalmente la stima dei tempi delle lavorazioni manuali, in particolare della formatura e i costi energetici legati all'installazione dei forni, al mantenimento in temperatura e alla manutenzione di quest'ultimi. Il modello qui proposto, a seguito di ulteriori implementazioni potrà essere applicato come risorsa integrativa nei software gestionali per la preventivazione di componenti, in particolare di componenti di cui il database del software non possiede dati storici.

## Bibliografia

- [1] R. G. Chougule, B. Ravi, *Casting cost estimation in an integrated product and process design environment*, Computer Integrated Manufacturing, 19(7) pag 676-688
- [2] L. Iuliano, *Manuale della fonderia*, Tecniche nuove, Milano 2007, capitoli 1,2 [3] K. B. Rundmann, *Metal casting*, Michigan Tech. University, capitolo1.
- [4] H. Fredriksoon, U. Akerlind, *Material processing during casting*, Wiley, British Library 2006, cap. 1,4.
- [5] D. Pocci, L. Iuliano, *Guida all'impiego dei componenti microfusi*, Tecniche nuove, Milano 2001, cap.1.
- [6] Kalpahjian, schmid, *manufacturing processes for engineering materials*, Prentice Hall, 2003.
- [7] G. B. Bralla, *Hndbook of product design for manufacturing*, mcgraw-Hill, New York, 1986.
- [8] H. Fredriksoon, U. Akerlind, *Material processing during casting*, Wiley, British Library 2006, cap 1,3.
- [9] Kobrak, *Design and early cost estimation of sand casting*, tesi, University of Rhode Island, 1993.
- [10] P. Dewhurst, C.Blum, *Support analyses for the economic assessmentof die casting in product design*, annals CIRP.
- [11] Durgesh Joshi1 and Bhallamudi Ravi, *Quantifying the Shape Complexity of Cast Part*, Institute of Technology and Science of Bombay.
- [12] R. G. Chougule, B.Ravi, *Variant process planning of castings using AHP-based nearest neighbour algorithm for case retrieval*, Institute of Technology and Science of Bombay.
- [13] William Lovejoy, Sebastian Fixson, Shaun Jackson, *Integrated Product Development (IPD)*, University of Michigan.
- [14] N. S. Tlale, j.l. steyn, s. Govender, *technical cost modelling for a novel semi-solid metal*.
- [15] Chougule, R.G., and Ravi, B., 2003, *Casting process planning using case based Reasoning*, Transactions of American Foundry Society, 2003, 111.

- [16] Chougule, R. G., and Ravi, B., 2004, *Variant process planning of castings using ahpbased nearest neighbor algorithm for case retrieval*
- [17] Chronister, T.G., 1975, *The Cost of making castings*. Casting Engineering, 7(4), 8–11.
- [18] Creese, R.C., Adithan, M., and Pabla, B., 1992, *Estimating and Costing for the Metal Manufacturing Industry* (New York: Marcel Dekker Inc.).
- [19] Francesco Veniali, *Progettazione del ciclo produttivo di un giunto a flange elastiche Periflex*, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”.
- [20] S. Kukla ,*Costs Analysis of Iron Casts Manufacturing*, archives of foundry engineering Volume 12 Issue 2/2012.
- [21] S. Kukla , *Evaluation and Verification of Time and Costs of Production Activities in Foundry Industry*, archives of foundry engineering , Volume 7 Issue 3/2007.
- [22] H. Wang, X. H. Zhou and X.-Y. Ruan, *Research on Injection Mould Intelligent Cost Estimation System and Key Technologies*.
- [23] P. Duverlie and J. M. Castelain, *Cost Estimation During Design Step: Parametric Method versus Case Based Reasoning Method*.
- [24] Mi Guofa, Liu Xiangyu, Wang Kuangfei, Fu Hengzhi, *Numerical simulation of low pressure die-casting aluminum wheel*, China Foundry, Vol.6 No.1, 1672-6421(2009)01-048-05
- [25] John Vlachopoulos and David Strutt, *Basic heat transfer and some applications in polymer processing*, Plastics Technician’s Toolbox, Volume 2, Pages 21-33, SPE 2002
- [26] Rafael Jung Hoon Lee, *Effect of Cooling Circuit Duration on Formation of Solidification Shrinkage in A356 Casting Automotive Wheels*, 2006, Auckland University of Technology
- [27] F. Bonollo, J. Urban, B. Bonatto, M. Botter, *Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark*, La Metallurgia Italiana, Pages 23-32, 06/2005
- [28] Velluvakkandi, Navaneeth, *Developing an Effective Die Cooling Technique For Casting Solidification*, 2009, Auckland University of Technology

[29] Stefano Broglio, *Appunti del corso di Tecnologie generali dei materiali a.a. 2009/10*, Università di Pavia

[30] Anthony L. R.N., Hawkins D. F., Macrì D. M., Kenneth Merchant A., *Sistemi di controllo. Analisi economiche per le decisioni aziendali*, 3rd edizione

[www.efoundry.iitb.ac.in](http://www.efoundry.iitb.ac.in)

[www.foseco.it](http://www.foseco.it)

[www.assofond.it](http://www.assofond.it)

[www.lme.co](http://www.lme.co)

[www.kme.com](http://www.kme.com)

[www.sir-mo.it](http://www.sir-mo.it)

[www.dies.it](http://www.dies.it)

[www.fivefoundry.com](http://www.fivefoundry.com)

[www.acciaiterni.it](http://www.acciaiterni.it)

[www.ilvataranto.com](http://www.ilvataranto.com)

[www.alcoa.com](http://www.alcoa.com)

[www.2metal.it](http://www.2metal.it)

[www.titierre.com](http://www.titierre.com)

[www.corasrl.it](http://www.corasrl.it)