

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Dipartimento di Ingegneria Meccanica
Specializzazione in Materiali e Tecnologie Innovative



INVESTMENT CASTING: CARATTERIZZAZIONE E MIGLIORAMENTO DEL PROCESSO DI INIEZIONE DEI MODELLI IN CERA (in collaborazione con Microcast s.r.l.)

Relatore: Prof. Quirico SEMERARO
Tutor aziendale: Dott.Ing. Jacek WOJNIAK (Microcast s.r.l.)

Tesi di Laurea di:
Simone LANZONI Matr. n. 750469

Anno Accademico 2014/2015

SOMMARIO

La fonderia a cera persa, anche detta *Investment Casting*, è una tecnologia fusoria presente in Italia da vari decenni e *Microcast s.r.l.* è una delle aziende leader di mercato nel paese.

Il continuo assottigliamento del margine di profitto portato dalla crisi degli ultimi anni e la ricerca di un maggiore controllo del proprio processo ha portato Microcast verso tecniche e procedure caratterizzate da una sempre maggiore ingegnerizzazione.

L'iniezione dei modelli in cera è la prima fase di questo lungo processo e a causa delle problematiche e delle peculiarità ad essa legate può essere sostanzialmente definita come un processo a sé stante.

Nonostante Microcast possieda macchine avanzate in grado di attuare al meglio tale operazione, la gestione e il controllo dei parametri di processo rimangono tuttora difficoltosi.

In riferimento a ciò si intende progettare un algoritmo che stima i parametri di processo ottimi al variare delle caratteristiche del particolare da iniettare.

Al netto dell'alto numero di codici prodotti in azienda, della complessità dell'iniezione ed alla complessità data dal legame con le fasi successive del processo, tale progetto potrebbe richiedere un lungo periodo nella raccolta dei dati ed alla relativa elaborazione.

Questa trattazione si prefigge innanzi tutto di costruire le ipotesi e le definizioni teoriche su cui basare l'intero progetto. Fatto ciò, si sfruttano le tecniche statistiche di miglioramento del processo (DOE, ANOVA, regressione lineare) per arrivare a definire il rapporto tra parametri di processo e la conformità del modello in cera.

Per questo motivo si seleziona un particolare effettivamente in produzione per cui attuare una sperimentazione completa, finalizzata all'ottimizzazione dei parametri di iniezione.

Tale sperimentazione è la chiave per comprendere quali siano i margini di miglioramento per il processo analizzato, oltre a tracciare la strada per l'ottimizzazione dei parametri di particolari differenti.

Parole Chiave: Investment Casting, Iniezione, Conformità, Miglioramento del Processo, Analisi della Varianza, Design of Experiment.

ABSTRACT

Investment Casting technology exist in Italy for several decades; *Microcast s.r.l.* is one of the leading companies in the country.

Because of the continuous decrease of the profit margin brought by the crisis of last years and the research for a greater process control, led Microcast toward a most development of engineering.

The injection of wax patterns is the first step in this long process. Because of its problems and peculiarities, the injection fase can be defined as a process in itself.

Even if Microcast owns advanced wax injection machines, management and control of the process parameters are hard to control.

In reference to this problem, the technical office wants to design an system that estimates the optimal process parameters as a function of the characteristics of the injected parts.

Considering the large number of different items produced by Microcast, the complexity of injection itself and bond with the next steps of the process, the project could take a long period in the achievement of a complete database and in the relative elaboration of the data.

The first part of the work has the purpose to build hypotheses and definitions to put the bases of the whole project. After that, statistical techniques for the process improvement (DOE, ANOVA, linear regression) are used to define the relationship between process parameters and conformity of wax patterns.

To optimize related parameters, it was selected a large production item to implement a full statistical analysis.

The experimentation is the key to understand how much we can improve the process for this and all other items.

Keywords: Investment Casting, Wax Injection, Conformity, Process Improvement, ANalysis Of VAriance, Design of Experiment.

RINGRAZIAMENTI

*«Pensa da uomo d'azione,
agisci da uomo di pensiero.»*

Henri Bergson

E' stata davvero un'odissea: un anno e mezzo di stress, spossatezza, rinunce, week end chiuso in casa, ferie rimandate, "domani non posso", "prima o poi ci vediamo", etc...

Gli ultimi cinque anni sono stati sicuramente i più duri della mia vita ma finalmente si può aprire un nuovo capitolo, egualmente impegnativo...ma forse un pochino più gestibile.

Non sarei mai stato in grado di superare questi anni (e soprattutto questo ultimo periodo allucinante) senza le persone che mi sono state più vicine. Hanno sopportato scleri senza precedenti, pseudo attacchi di panico, pacchi incredibili, isterismi della domenica e così via.

Naturalmente la prima dedica va alla mia famiglia tutta (Mamma, Papà, Marilena, Gianni, tutti i miei nonni e gli zii) che mi ha sostenuto nell'animo, nel corpo e pure nel portafoglio. Senza di loro semplicemente non ce l'avrei fatta...

Un applauso lungo un secolo va ai miei amici e fratelli (non è necessario che vi citi tutti, vero?)...è da cinque anni che sopportano l'esclamazione "stasera non posso!!!". La vita mi ha regalato delle persone splendide con cui condividere le risate e le idiozie del sabato sera...ogni volta che ho dovuto rinunciare a questi momenti a causa dello studio o della stanchezza è stata per me una perdita insormontabile.

Un grazie ai miei compagni di viaggio dei primi anni universitari (Pari, Miguel, Emy, Paganz, Max, Saro, Yaris, Luca, Minots, Sbrilla, Darietto, Saita, Enry, Paolo) e degli ultimi (Albe, Fedè, Micky, Simo, Abram, Vale, Giulio, Dany) che ognuno a modo suo mi ha aiutato tante tante volte a superare gli ostacoli....sicuramente avrò dimenticato qualcuno!

Tra questi voglio ringraziare in particolare lo Zano anche per i mille aiuti che mi ha dato per questo lunghissimo lavoro: probabilmente senza di lui starei ancora cercando di capire come si redige una bibliografia con Latex.

Un ringraziamento va anche alla Microcast e in particolare ai miei colleghi dell'UTE (vecchi e nuovi) per avermi sostenuto e sospinto verso questo importante risultato: Davide per quattro anni e Vanessa negli ultimi mesi sono stati dei grandissimi compagni di viaggio...credo proprio dovrò offrirvi una cena, ragazzi!

Naturalmente ringrazio anche l'Ing. Wojniak...magari non si va sempre d'accordo ma grazie a lui ora posso dire di aver imparato a lavorare e in questi anni mi ha fornito millemila spunti fondamentali inseriti poi nelle pagine di questa tesi.

Nello stesso senso di marcia, anche se attraverso strade completamente opposte, ho ricevuto un grande aiuto anche dal Prof. Semeraro: un enorme grazie anche a lui, che mi ha seguito e inseguito nonostante le mie lungaggini.

Per concludere in bellezza, ringrazio la persona che (nonostante l'ingegneria proprio non sia il suo mestiere) più mi ha aiutato in tutto questo. Gli anni passati insieme sono stati densi di rinunce dovute allo studio, ma finalmente la c***o di tesi è fatta!!!! Grazie davvero per avermi offerto la tua spalla e il tuo calore ogni volta che mi sono sentito giù. Grazie per avermi spinto a dare il massimo anche se questo significava portare via del tempo a noi due.

Dedico a te questo immane lavoro perché davvero sei stata insostituibile. Grazie Mira.

Grazie a tutti di cuore,
SImo

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
1.1	Finalità del progetto	1
1.1.1	Microcast e il progetto aziendale	1
1.1.2	Obiettivo della trattazione	4
1.2	La fonderia a cera persa	7
1.2.1	Alcuni cenni storici	7
1.2.2	Il processo Microcast	10
1.2.3	Pregi e difetti del processo	17
2	LA FASE DI INIEZIONE	19
2.1	La cera, la materia prima dell'iniezione	19
2.1.1	Considerazioni generali	19
2.1.2	Caratteristiche fondamentali	22
2.1.3	Possibili classificazioni	23
2.1.4	Il composto utilizzato per la sperimentazione	24
2.2	Lo stampaggio ad iniezione	25
2.2.1	Caratteristiche generali	25
2.2.2	Le presse ad iniezione	26
2.2.3	La pressa ad iniezione LC55	29
2.2.4	Il ciclo di iniezione	34
3	LE VARIABILI DI PROGETTO	37
3.1	I parametri d'iniezione	38
3.1.1	Parametri di temperatura	39
3.1.2	Parametri di pressione	41
3.1.3	Parametri di tempo	42
3.1.4	Selezione delle variabili modificabili	44
3.2	Conformità di un modello in cera	49
3.2.1	Deformazioni per errato posizionamento	51
3.2.2	Deformazione in fase di estrazione	55
3.2.3	Incompletezze	59
3.2.4	Avvallamenti	61
3.2.5	Rigonfiamenti	64
3.2.6	Linee di flusso	67

3.2.7	Bolle d'aria	69
3.2.8	Giunti freddi	72
3.2.9	Anomalie dimensionali lineari	74
4	PROPEDEUTICA ALLA SPERIMENTAZIONE	81
4.1	Ordinamento e selezione del campione di sperimentazione .	81
4.1.1	Obiettivo e ipotesi alla base del metodo	84
4.1.2	Descrizione dell'algoritmo	86
4.1.3	Commenti ai risultati dell'ordinamento	90
4.2	Preparazione all'esperimento di screening	92
4.2.1	L'esperimento di pre-screening	92
4.2.2	Misurazione dei modelli	94
4.2.3	Analisi dei dati	96
4.2.4	Il test di potenza	103
5	L'ESPERIMENTO DI SCREENING	109
5.1	Descrizione dell'item selezionato	110
5.2	Descrizione del piano sperimentale	113
5.2.1	Selezione del piano sperimentale	113
5.2.2	I livelli dei parametri	118
5.3	Le variabili di risposta	119
5.3.1	Rapporto tra parametri d'iniezione e risposte	119
5.3.2	Risposte considerate per mod.2577	120
5.4	Analisi dei dati	124
5.4.1	Selezione delle risposte da analizzare	124
5.4.2	Analisi delle risposte considerate	127
5.4.3	Definizione dei range di conformità delle variabili di risposta analizzate	137
5.4.4	Definizione dei modelli di regressione	142
5.4.5	Ottimizzazione dei parametri d'iniezione per mod. 2577	145
6	CONCLUSIONI	151
6.1	Modello 2577: conferma dei risultati	151
6.1.1	Risultati dell'esperimento	153
6.1.2	Miglioramento continuo del processo	156
6.2	Sviluppo del progetto aziendale	157
6.2.1	Considerazioni sui costi	159
6.2.2	Avanzamento tecnico relativo al progetto	163

Appendici	169
A SPECIFICHE TECNICHE PRESSA LC55	169
B ELENCO DEI PARAMETRI DI PROGETTO	171
C DISEGNI DEI MODELLI STUDIATI	175
D MISURAZIONE RISPOSTE MOD. 2577	179
D.1 Routine di Misura tramite CMM	179
D.2 Scala visiva ordinale	184
INDICE ANALITICO	186
BIBLIOGRAFIA	189

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1.1	Schematizzazione dei passi eseguiti dall'algoritmo	3
Figura 1.1.2	Schematizzazione dei passi iniziale finalizzati alla creazione del database	5
Figura 1.1.3	Rappresentazione dello spazio di conformità	7
Figura 1.1.4	Argomenti affrontati nella trattazione	8
Figura 1.2.1	Schematizzazione del processo Microcast	11
Figura 1.2.2	Un esempio di grappolo assemblato	12
Figura 1.2.3	I dispositivi automatici del locale formatura Microcast	14
Figura 1.2.4	Riempimento dello stampo ceramico con acciaio liquido	16
Figura 2.1.1	Rapporto qualitativo durezza/temperatura durante il passaggio di stato solido/liquido della cera	21
Figura 2.1.2	Rapporto qualitativo espansione/temperatura durante il passaggio di stato solido/liquido della cera	22
Figura 2.2.1	I due diversi layout per le presse ad iniezione per la cera	28
Figura 2.2.2	La pressa LC55 Micorcast	29
Figura 2.2.3	Schema della pressa LC55	31
Figura 2.2.4	Un periodo completo del ciclo di iniezione	35
Figura 3.1.1	Raffigurazione dell'impianto di iniezione di LC55	40
Figura 3.1.2	Andamento qualitativo nel tempo di portata e pressione durante il riempimento dello stampo	44
Figura 3.1.3	Andamento qualitativo dei parametri durante il ciclo di iniezione	45
Figura 3.2.1	Schemi esemplificativi dei casi considerati per l'approssimazione della deformazione in posizionamento	53
Figura 3.2.2	Immagine esplicativa delle variabili utili alla definizione di A_{tr}	57
Figura 3.2.3	Eigonfiamento per bolla d'aria.	64
Figura 3.2.4	Esempi di manifestazione di linee di flusso su particolari in produzione	67

Figura 3.2.5	Rappresentazione della sezione del generico volume cieco	71
Figura 3.2.6	Rappresentazione della formazione di un giunto freddo	72
Figura 3.2.7	Esemplificazione delle variabili inerenti alla sezione di passaggio del flusso diviso	74
Figura 3.2.8	Andamento qualitativo semplificato dell'ampiezza dei range di tolleranza per dim. lineari al variare del valore della dimensione del grezzo di fusione	76
Figura 3.2.9	L'azione dello Shift sulla variabilità del processo	77
Figura 4.1.1	Andamento dei diversi vettori di pesatura	88
Figura 4.1.2	Le varie scelte strategiche al di fuori del metodo di ordinamento	91
Figura 4.1.3	Grafici relativi all'analisi ABC sugli stampi in graduatoria	91
Figura 4.2.1	Schizzo di mod.2648-08	93
Figura 4.2.2	Dimensioni misurate a valle dell'esperimento di pre-screening	95
Figura 4.2.3	Confronto tra i test di normalità di L_3 e L_4	98
Figura 4.2.4	Grafici relativi ai dati L_3	99
Figura 4.2.5	Analisi di autocorrelazione	100
Figura 4.2.6	Report della tabella ANalysis Of Variance (ANOVA) GLM L_4 vs <i>spurgo</i>	101
Figura 4.2.7	Grafici relativi all'analisi della varianza L_3 vs <i>spurgo</i>	102
Figura 4.2.8	Ricerca del valore che individua il 10% di scarto totale su mod. 2648-08	106
Figura 4.2.9	Risultato grafico del test di Potenza	108
Figura 5.1.1	Immagini relative al codice stampo 2577	110
Figura 5.1.2	Superfici di controllo di 2577-00	111
Figura 5.1.3	Quota di controllo larghezza forcella	112
Figura 5.1.4	Modalità di posizionamento dopo iniezione di mod. 2577	113
Figura 5.2.1	I design Split-plot proposti da Minitab 16©	115
Figura 5.2.2	Schematizzazione dell' Alias structure del piano progettato	117
Figura 5.2.3	Schematizzazione del piano di sperimentazione utilizzato non casualizzato	117
Figura 5.3.1	Schema delle caratteristiche dimensionali rilevate	122
Figura 5.4.1	Analisi di correlazione tra le risposte misurate	125

Figura 5.4.2	Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta m_2 . . .	128
Figura 5.4.3	Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta α . . .	131
Figura 5.4.4	Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta f_2 . . .	132
Figura 5.4.5	Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta v_b . . .	134
Figura 5.4.6	Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta v_{lf} . . .	136
Figura 5.4.7	Schema esplicativo dell'operazione di caratterizzazione della quota f_2	139
Figura 5.4.8	Informazioni relative alla regressione lineare delle risposte analizzate (il Contour plot riporta i due fattori più influenti del modello)	144
Figura 5.4.9	Contour plot dello spazio dei parametri al variare di t_{tot} (lo spazio di conformità è evidenziata in giallo)	146
Figura 5.4.10	Contour plot dello spazio dei parametri per $t_{tot} = 30$ s (lo spazio di conformità è indicato in giallo) . . .	147
Figura 5.4.11	Contour plot dello spazio dei parametri per $t_{tot} = 30$ s al variare della c.c. sulla variabile di risposta v_b (lo spazio di conformità è evidenziata con i colori più chiari)	148
Figura 5.4.12	Contour plot dello spazio dei parametri per $t_{tot} = 30$ s indicante il punto di funzionamento selezionato P_f	149
Figura 6.1.1	Risultato del test di potenza effettuato	155
Figura 6.1.2	Regione di conformità al variare del vincolo imposto su v_{lf} ($t_{tot} = 30$ s)	157
Figura 6.2.1	Tempo di iniezione annuale dei dieci codici più prodotti in Microcast	161
Figura A.0.2	Specifiche tecniche della pressa LC55 utilizzata per la sperimentazione	170
Figura C.0.3	Disegno di massima di mod. 2648-08 (dimensioni relative al grezzo di fusione)	175
Figura C.0.4	Disegno di massima dell'item 2577-00 (dimensioni relative al grezzo di fusione)	176
Figura C.0.5	Disegno di massima di mod. 2577 (dimensioni relative al grezzo di fusione)	177
Figura D.1.1	Posizione dei punti acquisiti per la definizione dei riferimenti di misura di mod. 2577	182

Figura D.1.2 Posizione dei punti acquisiti per la successiva emissione delle risposte 183

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2.1.1	Caratteristiche del composto RECLM+ADDMICRo1	25
Tabella 2.1.2	RECLM+ADDMICRo1: range di utilizzo per l'iniezione	25
Tabella 2.2.1	Elenco degli istanti che compongono il ciclo di iniezione	34
Tabella 3.1.1	Parametri di temperatura modificabili, associati alle diverse zone della pressa	39
Tabella 3.1.2	Parametri di pressione modificabili sulla pressa	42
Tabella 3.1.3	Parametri di tempo modificabili sulla pressa	43
Tabella 3.1.4	Variabili legate al tempo di iniezione	43
Tabella 3.2.1	I range di tolleranza utilizzati in Microcast in funzione della dimensione lineare x_{dim}	75
Tabella 4.1.1	Le prime posizioni della graduatoria in funzione del vettore di pesatura utilizzato.	89
Tabella 4.2.1	Parametri di iniezione per lo stampo 2648	93
Tabella 4.2.2	Analisi di correlazione tra le caratteristiche misurate	96
Tabella 4.2.3	Statistica descrittiva delle caratteristiche misurate	97
Tabella 4.2.4	Elaborazione della statistica descrittiva per le caratteristiche misurate	98
Tabella 4.2.5	Dati del test di potenza	107
Tabella 5.2.1	Caratteristiche del piano di sperimentazione selezionato	116
Tabella 5.2.2	Valori dei parametri modificabili considerati per l'esperimento di screening a confronto con lo standard	119
Tabella 5.3.1	Risposte rilevate per la caratterizzazione di mod.2577	121
Tabella 5.4.1	Risposte analizzate per la caratterizzazione di mod. 2577	126
Tabella 6.1.1	Valori dei parametri d'iniezione considerati per l'esperimento di conferma	152
Tabella 6.1.2	Valori delle variabili di risposta teoriche nel punto di funzionamento, calcolate tramite i modelli di regressione	152

Tabella 6.1.3	Risultati dell'esperimento di conferma	153
Tabella 6.1.4	Dati del test di potenza effettuato	155
Tabella 6.2.1	Parametri di progetto di mod.2577	158
Tabella 6.2.2	Tempi totali d'iniezione per 2577-00	159
Tabella 6.2.3	Informazioni utili alla stima dei costi di iniezione di 2577-00	160
Tabella B.0.4	Tabella riassuntiva totale dei parametri d'iniezione .	171
Tabella B.0.5	Tabella riassuntiva totale dei parametri di progetto misurabili non modificabili	172
Tabella B.0.6	Tabella delle dipendenze tra parametri misurabili e difettologie considerate	173
Tabella D.1.1	Routine automatica di acquisizione dei riferimenti per la misurazione del mod.2577	179
Tabella D.1.2	Routine automatica di acquisizione dei dati per le analisi di mod. 2577	180
Tabella D.1.3	Routine automatica di emissione delle risposte per l'analisi di mod. 2577	181
Tabella D.2.1	Scala di caratterizzazione visiva per la valutazione della presenza di bolle d'aria	184
Tabella D.2.2	Scala di caratterizzazione visiva per la valutazione della presenza di linee di flusso	185

1

INTRODUZIONE

1.1 FINALITÀ DEL PROGETTO

1.1.1 Microcast e il progetto aziendale

L'idea del progetto che ha ispirato questa tesi universitaria è stata sviluppata con e per *Microcast S.r.l.*; tale ricerca è volta ad un miglioramento sostanziale del processo produttivo aziendale.

Microcast è un'azienda italiana con sede a Mortara (PV) che si occupa prevalentemente della realizzazione di particolari in acciaio tramite il processo di *fonderia a cera persa*.

L'azienda nasce nel 1981 per assecondare le necessità produttive di un pool di aziende calzaturiere vigevanesi.

Queste ultime necessitavano spesso di particolari in acciaio di piccole dimensioni con buona precisione e finitura superficiale: per questo motivo è stato avviato nella stessa Vigevano un apposito stabilimento per l'utilizzo della tecnologia di fonderia a cera persa.

Con il passare degli anni l'azienda si è staccata sempre più dal settore calzaturiero fino a divenire un'azienda completamente indipendente. Nei primi anni '90 Microcast è stata trasferita nell'attuale sede di Mortara.

Oggi Microcast è tra le prime fonderie a cera persa del paese per fatturato e si occupa di sub-fornire aziende in molteplici campi industriali (tessile, automotive, energetico, aeronautico, medicale, etc.).

La produzione è centrata su particolari in acciaio di piccole-medie dimensioni (2 g ÷ 10 kg). Il core business è rappresentato dal settore automotive per cui il processo di cera persa è conveniente per particolari come flange, raccordi e piastre sagomate.

Tali particolari sono caratterizzati da geometrie complesse e buona precisione dimensionale e di forma, difficilmente realizzabili a costi competitivi tramite altre tecnologie più comuni.

Essendo Microcast una realtà sviluppata dall'esperienza e dalle generazioni precedenti, solo negli ultimi anni ha iniziato a fare uso di sviluppo in-

gegneristico mirato, finalizzato a migliorare il processo ed a minimizzare i costi.

Senza entrare nel dettaglio (si rimanda al Paragrafo 1.2.2 per una spiegazione dettagliata del processo totale e delle sue fasi), il progetto si concentra sulla fase di *iniezione dei modelli in cera*, passo iniziale dell'intero processo.

Tale operazione, compiuta tramite delle presse ad iniezione, necessita di alcuni parametri in ingresso che variano per ogni item prodotto in azienda.

La fase di definizione e/o di modifica di tali parametri è sempre stata affrontata tramite l'esperienza di pochi, senza l'apporto di alcun dispositivo decisionale basato su un'analisi oggettiva dell'operazione.

Il progetto ha appunto l'obiettivo di analizzare e caratterizzare nel dettaglio questa specifica fase del processo aziendale.

La caratterizzazione è finalizzata alla ricerca dell'ottimo dei parametri di processo di tale fase per ogni item prodotto, in modo tale da non dover più affidarsi completamente all'esperienza del tecnico.

E' importante sottolineare che l'operazione studiata è la fase iniziale del processo totale: ciò significa che la conformità di un modello in uscita da questa fase non porta necessariamente alla conformità del prodotto finale.

Prima della consegna di un singolo particolare, esso compie molte altri passaggi complessi: è perciò necessario definire la conformità di un modello anche in funzione delle varie trasformazioni che esso subisce.

Durante l'esperienza in Microcast e leggendo articoli inerenti al processo, è chiaro come l'ottimizzazione dei parametri di iniezione sia spesso ottenuta per un singolo codice, tramite simulazione computerizzata dell'operazione o tramite sperimentazione.

Tali sistemi non sono però mai finalizzati alla conformità generale; al contrario, si cerca la conformità del singolo item, senza osservare il problema da un punto più distante.

In questa trattazione si cerca di mantenere una visione globale della fase di iniezione, cercando di standardizzare il più possibile le variabili che permettono (o che precludono) la conformità di un modello in cera.

Attuata la fase di analisi globale, ci si concentra sulle peculiarità dei diversi item.

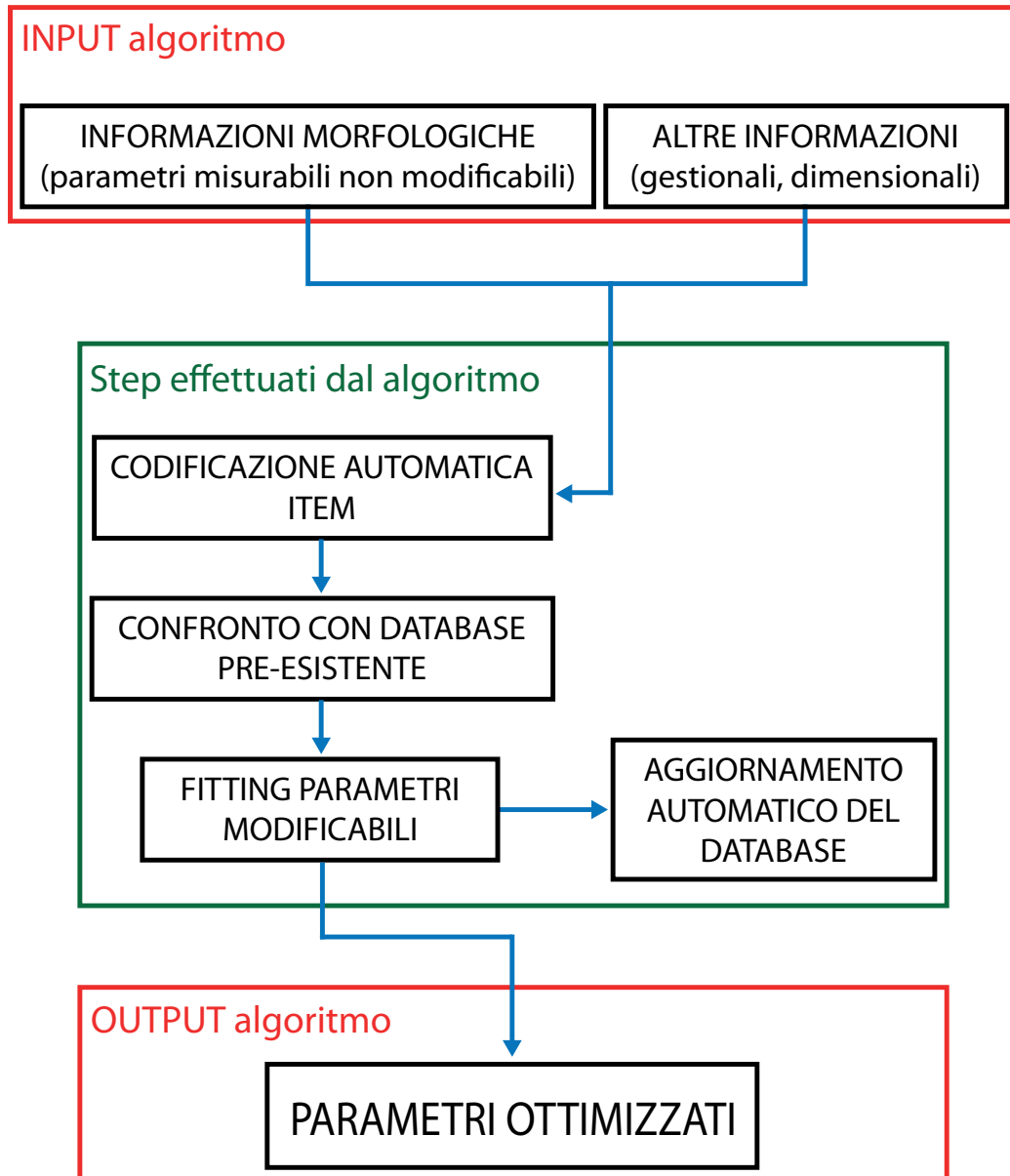


Figura 1.1.1: Schematizzazione dei passi eseguiti dall'algoritmo

Il progetto è infatti finalizzato a creare un algoritmo che, ricevendo in ingresso delle informazioni sull'item, restituisce i parametri di processo ottimizzati, basandosi però sulle nozioni globali di conformità.

In Figura 1.1.1 si può osservare un diagramma esplicativo di come funzionerebbe l'algoritmo finale.

Lo sviluppo di un algoritmo di questo tipo è possibile solo grazie ad una massiva raccolta di dati in continuo aggiornamento e di un'apposita sperimentazione, finalizzata a ricercare e modellare lo spazio in cui un modello può essere ritenuto conforme.

Tale spazio deve essere funzione sia delle caratteristiche dell'item, sia dei vincoli di conformità globale.

Effettuando apposite sperimentazioni di caratterizzazione su diversi item di riferimento ed elaborando i dati in modo da ottenere l'ottimizzazione dei parametri è possibile creare un primo database.

Sviluppando poi il database in modo da associare i parametri ottimizzati a degli indici misurabili, è possibile elaborare un codice di identificazione che rende univoco ogni item.

Si è definito uno schema di pensiero dei passi iniziali del progetto consultabile in Figura 1.1.2.

Lo schema esemplifica come verranno create le prime righe del database necessario all'algoritmo finale.

A progetto completato, ogni qualvolta che sarà necessario definire i parametri di iniezione di un item, si dovranno solamente inserire le relative informazioni misurabili in input.

Il sistema sfrutterà quindi il database esistente per interpolare i parametri di iniezione dei codici simili e costruire così una nuova serie di parametri ottimizzati.

1.1.2 Obiettivo della trattazione

La totalità del progetto, per come è stato descritto nel paragrafo precedente, è un lavoro che verrà sviluppato in Microcast nel corso del tempo.

Si tratta di un progetto ambizioso, sia per quanto riguarda la raccolta dati, sia per lo sviluppo pratico di un possibile software basato sull'algoritmo.

E' perciò naturale che questa trattazione non comprenda lo sviluppo totale del progetto ma solo una parte di esso.

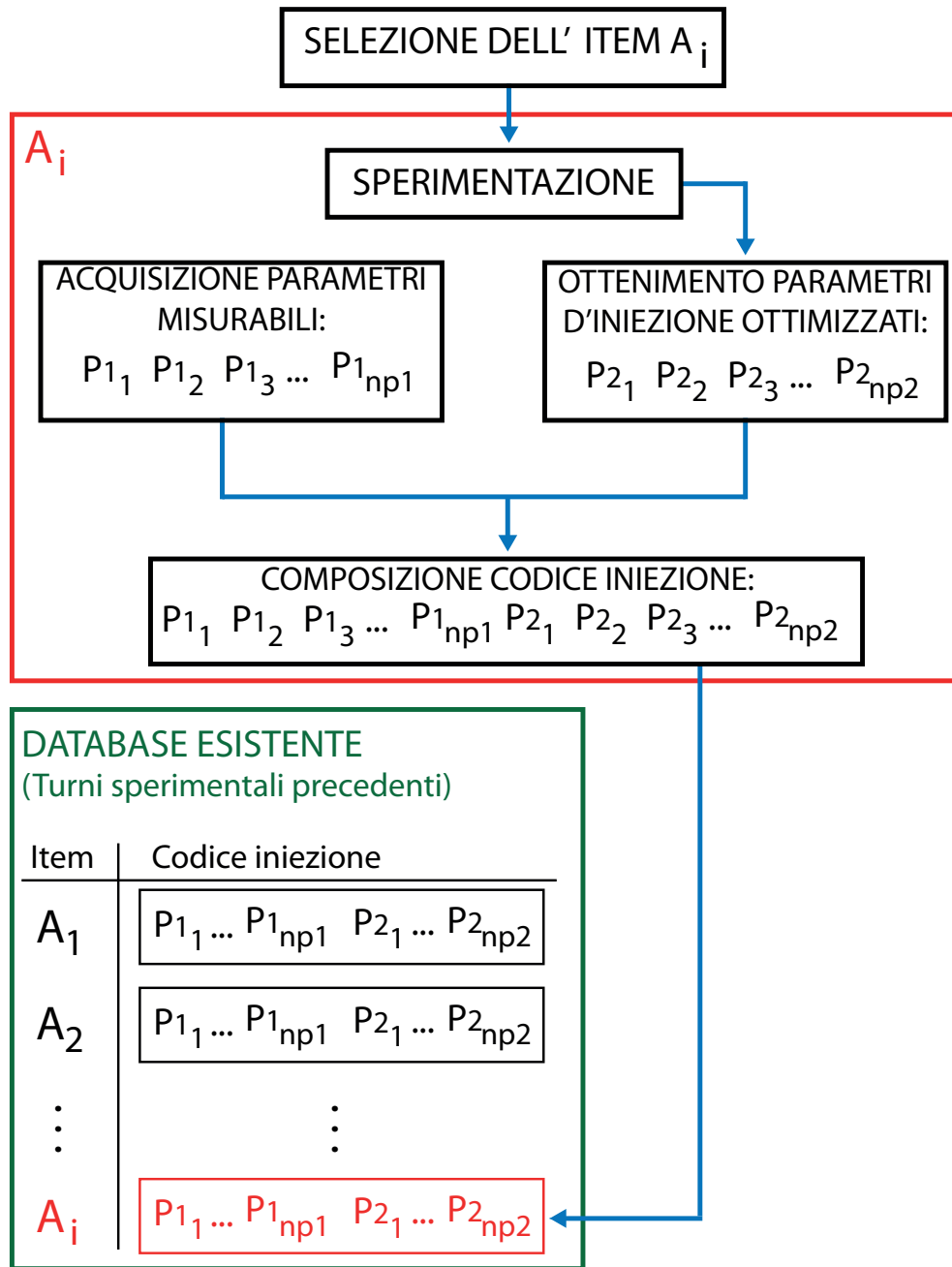


Figura 1.1.2: Schematizzazione dei passi iniziale finalizzati alla creazione del database

In questa trattazione si sviluppa principalmente l'aspetto teorico del problema, ossia la caratterizzazione globale della fase di iniezione del processo Microcast.

Ciò comprende uno studio approfondito di tutti i parametri in ingresso della fase di iniezione, ossia i parametri che possono essere ottimizzati.

Si studiano inoltre le peculiarità dell'iniezione, legando il discorso con la definizione di conformità del modello in cera.

La conformità viene stabilita in base alle richieste del cliente: la presenza (o la non presenza) delle varie difettologie secondo tali istruzioni porta ad accettare o meno un modello.

Le difettologie riscontrabili influiscono direttamente sui vari parametri misurabili che rendono univoco ogni item (INPUT dell'algoritmo) e sono anche l'indice per stabilire la conformità dei particolari studiati con la sperimentazione.

Successivamente si passa a studiare un metodo per ordinare e selezionare i primi item di cui analizzare il processo di iniezione.

Uno di questi viene selezionato per attuare su di esso la parte di sperimentazione tramite le tecniche statistiche di miglioramento del processo, al fine di modellare il comportamento della conformità in funzione dei parametri in ingresso.

A tale proposito viene ricercata una porzione dello spazio di funzionamento dei parametri atta a rispettare la definizione di conformità: tale zona viene definita come *spazio di conformità* e rimane sempre al centro dei ragionamenti riportati.

In Figura 1.1.3 si riporta un'immagine esplicativa dell'idea descritta, dove X_1 e X_2 sono i parametri da ottimizzare mentre V_1 , V_2 e V_3 sono gli spazi di esistenza dei relativi vincoli alla conformità del modello.

La zona di intersezione rappresenta lo spazio di conformità in cui ottimizzare i parametri del processo.

Al fine di visualizzare la totalità degli argomenti che vengono affrontati durante la trattazione, si osservi Figura 1.1.4.

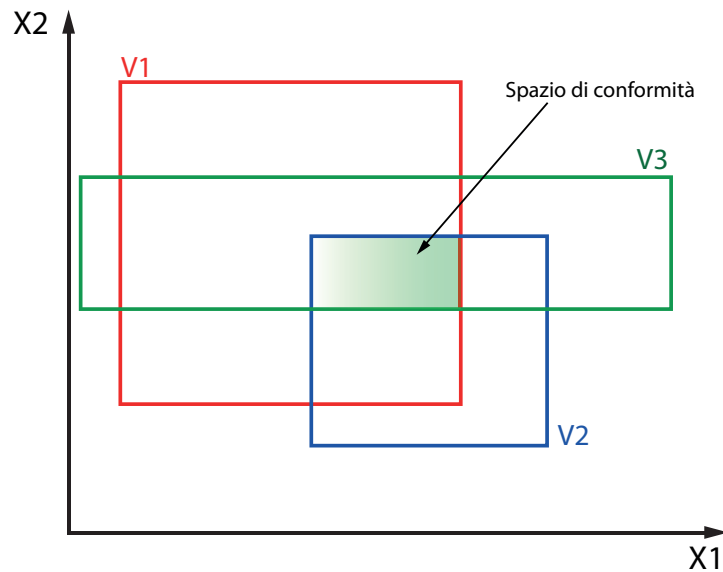


Figura 1.1.3: Rappresentazione dello spazio di conformità

1.2 LA FONDERIA A CERA PERSA

1.2.1 Alcuni cenni storici

La fonderia a cera persa è un processo che nasce nell'età del bronzo come tecnica scultorea al fine di realizzare manufatti in bronzo, argento o oro, andando però a plasmare modelli in cera d'api.

In passato si modellava l'oggetto in cera, si creava intorno ad esso uno stampo in argilla o in gesso e, una volta eliminata la cera tramite riscaldamento dello stampo (da qui il termine "cera persa"), si poteva colare il metallo nello stampo per avere la scultura desiderata.

Tale tecnica conobbe una notevole fioritura soprattutto nell'arte greca e romana fino ad arrivare a grandi artisti come Donatello, Ghiberti e Matisse.

Un primo approccio al mondo industriale è arrivato nel ventesimo secolo per la riproduzione dei calchi dentari, campo in cui tale tecnica è ancora ampiamente utilizzata.

Stesso discorso vale per il settore della gioielleria, dove la cera persa è utilizzata da centinaia d'anni e che ora viene sfruttata tramite la tecnica di modellazione tridimensionale della stereolitografia, abbinata alla colata centrifuga.

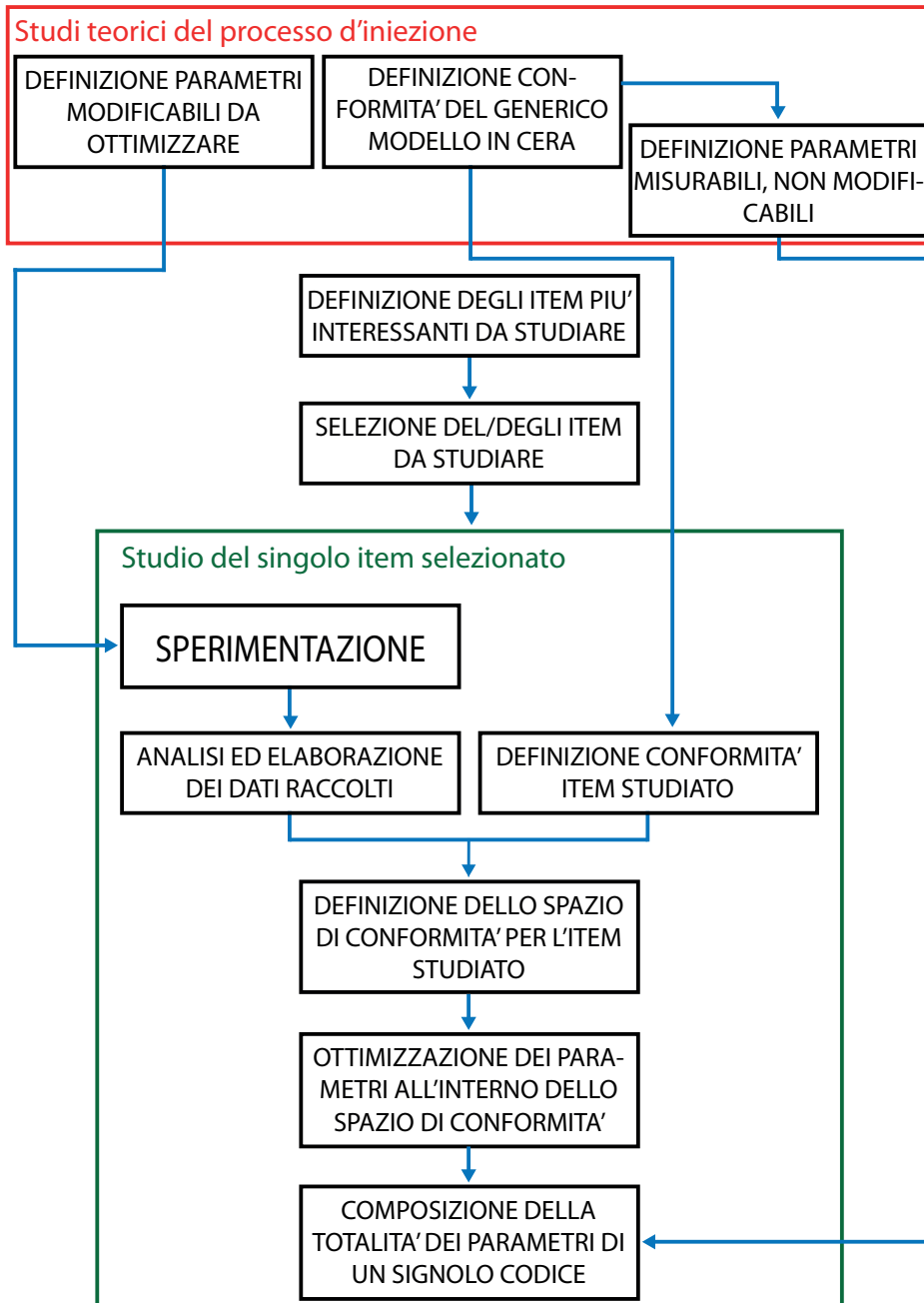


Figura 1.1.4: Argomenti affrontati nella trattazione

La vera svolta industriale si ebbe negli anni '30 del ventesimo secolo con l'avvento della Seconda guerra mondiale.

Il conflitto imponeva una domanda elevata di componenti complessi che non poteva essere soddisfatta con le tecnologie allora comuni.

Ad esempio, la produzione di particolari di precisione per le turbine a gas come le palette o gli statori sono molto complessi da eseguire tramite asportazione di truciolo ma semplici utilizzando la fusione a cera persa.

L'utilizzo di rivestimenti refrattari rendeva inoltre possibile ottenere i particolari in materiale ad alto punto di fusione necessari nelle turbine a gas.

E' stato necessario adattare il processo classico della cera persa al mondo industriale tramite alcuni punti fondamentali:

Necessità	Risoluzione problema
Riproducibilità dei particolari	Introduzione di limiti di tolleranza Modelli ricavati tramite iniezione della cera in uno stampo
Produzione di particolari con alti punti di fusione	Introduzione e utilizzo di materiali resistenti ad alte temperature Metallurgia con alti standard qualitativi
Minimizzazione dei costi	Utilizzo di materiali a basso costo Standardizzazione del processo

Tramite questa trasformazione il processo di fusione a cera persa ha assunto un ruolo chiave per l'industria bellica degli Stati Uniti d'America e della Gran Bretagna durante tutta la seconda guerra mondiale.

L'espansione di questo settore ebbe poi una buona crescita nel dopoguerra, in cui i campi di applicabilità di tale processo si moltiplicarono.

Si raggiunse la massima espansione della tecnologia negli anni '90; ad esempio, nel 1994 questa tecnologia rappresentava circa il 18% dell'intero fatturato nazionale dovuto alle fonderie della Gran Bretagna.

Nel tempo, il termine "fonderia a cera persa" è divenuto obsoleto almeno nei paesi anglosassoni.

La definizione *lost wax* che descriveva la tecnica artistica è stata sostituita da *Investment casting* con cui si individua la tecnica fusoria attualmente utilizzata in campo industriale.

1.2.2 Il processo Microcast

Il processo della fonderia a cera persa che si utilizza oggi varia poco nella teoria rispetto all'antica tecnica scultorea.

I passaggi principali sono i medesimi e i materiali sono simili; a variare sono le modalità con cui le singole fasi sono gestite e il mantenimento della qualità del processo, necessario a rendere il processo ripetibile e con minimo scarto.

Si descrivono ora le singole fasi del processo Microcast, al fine di chiarire i passaggi base di questa tecnologia.

Si introdurranno terminologie usate nel campo che in alcuni casi verranno riutilizzate durante la trattazione.

Chiaramente qui viene fornita solamente una spiegazione di massima dei vari passi del processo; per approfondimenti, si consulti [1].

Iniezione dei modelli in cera

La fase di iniezione dei modelli in cera rappresenta la parte di processo su cui si basa l'intera trattazione: verrà perciò discussa ampiamente nel Capitolo 2. In questa sezione se ne riporta solo una breve descrizione.

In questa fase iniziale la cera viene immessa all'interno di uno stampo sagomato tramite una pressa ad iniezione.

La cera, solitamente in stato semi-liquido, viene sospinta nei canali di entrata e viene fatta raffreddare in pressione a stampo chiuso fino ad ottenere una sufficiente solidificazione.

Una volta aperto lo stampo, il modello in cera risultante, detto anche *pattern*, viene estratto e posizionato su appositi pianali per raggiungere la temperatura ambiente così da raggiungere una completa stabilità del materiale.

Escludendo i casi particolari, i modelli sono provvisti di attacchi di colata al fine di facilitare l'operazione successiva di assemblaggio e in modo da rendere ripetibile la modalità di afflusso della lega in colata.

Assemblaggio dei grappoli

In questa fase i modelli in cera vengono prelevati e incollati su di un corpo di sostegno pre-costruito. L'insieme di questi elementi è comunemente detto *grappolo* o *cluster*.



Figura 1.2.1: Schematizzazione del processo Microcast

Il generico cluster possiede sempre un elemento centrale, chiamato comunemente *bastone*, che funge da corpo di alimentazione primaria durante la colata e da sostegno strutturale all'intero grappolo.

Per massimizzare il numero di pezzi per grappolo e ottimizzare l'afflusso della lega in colata, vengono incollati degli elementi di alimentazione secondaria ai lati del bastone in corrispondenza della sezione minore: questi corpi vengono definiti *runner*. A loro volta, i pezzi vengono posizionati sui runner generando una sorta di matrice regolare.

L'incollaggio di tutti i diversi elementi avviene tramite saldatura, semplicemente riscaldando la cera nel punto in cui si vuole posizionare il modello sul pattern.

In Figura 1.2.2, si può osservare un esempio classico di grappolo assemblato; in figura sono anche evidenziati i vari elementi del grappolo.

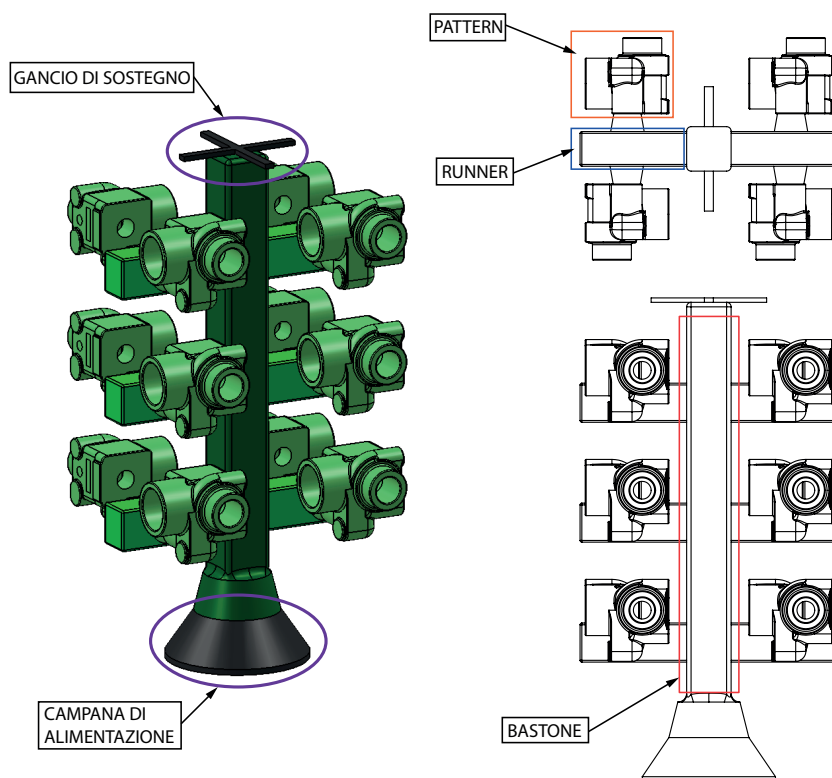


Figura 1.2.2: Un esempio di grappolo assemblato

Microcast utilizza varie tipologie di bastoni e runner ma nella maggior parte dei casi sono entrambi di geometria parallelepipedica allungata. Ovviamente, i runner sono sempre di dimensione minore rispetto ai bastoni.

Il bastone possiede un'anima metallica (lega di alluminio o acciaio) che viene rivestita da alcuni strati di cera liquida prima della fase di assemblaggio.

Ad una delle estremità del bastone viene applicata la cosiddetta *campana di alimentazione*, ossia un corpo tronco-conico (vedere 1.2.2) in materiale refrattario che funge da punto di ingresso della lega in colata.

Come si può osservare in Figura 1.2.2, ad ogni grappolo viene unito un gancio a forma di croce sull'estremità opposta alla campana.

Il gancio in questione è necessario al posizionamento dei grappoli sulla catena di formatura.

In funzione del peso, dell'ingombro e della geometria del particolare, in fase di progettazione del processo verrà ideato uno schema di montaggio opportuno e facilmente ripetibile.

Nella sua forma più semplice, tale schema indica la quantità di particolari da incollare, dimensione e geometria degli elementi del grappolo e la modalità con cui disporre i modelli su di esso.

L'insieme delle operazioni di costruzione del grappolo e di incollaggio dei modelli è comunemente chiamato *Montaggio* ed è realisticamente tra le fasi chiave del processo poiché sono necessari grandi manualità e precisione da parte degli operatori.

A meno di casi particolari, tale insieme di operazioni non può essere svolta da sistemi automatici; è anzi necessaria una mano d'opera dotata di esperienza.

Formatura del guscio ceramico

Durante la fase di formatura viene creato lo stampo ceramico a perdere intorno ai modelli incollati sul singolo grappolo.

Ciò avviene tramite il fissaggio di più strati di materiale refrattario sulla superficie del grappolo.

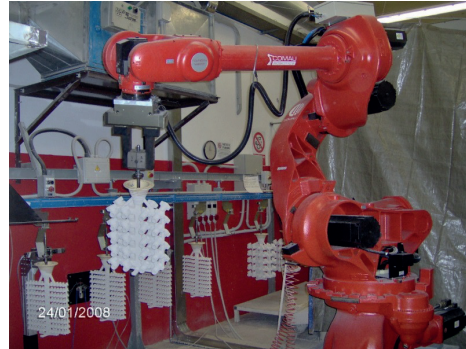
Una volta essiccato, tale copertura rappresenterà la matrice in cui verrà colata la lega.

Vengono utilizzati materiali refrattari diversi in funzione della stratificazione. Generalmente si applicano strati a granulometria crescente, ossia il primo strato sarà il più fine e via via fino all'ultimo, caratterizzato da una grana grossolana.

Il numero di strati e la composizione di ogni strato variano in funzione di molteplici parametri tra cui la lega colata, la geometria del grappolo e del singolo pezzo.



(a) Uno dei due robot addetti alla formatura



(b) La catena per l'ordinamento dei grappoli durante la formatura

Figura 1.2.3: I dispositivi automatici del locale formatura Microcast

Una sequenza caratterizzata da essiccazioni lunghe tra uno strato e l'altro e molte stratificazioni porta ad un guscio ceramico solido e resistente, in grado di sopportare la forte pressione metallostatica dell'acciaio liquido e la sua energia termica.

Al contrario, una sequenza con essiccazioni troppo brevi e poche stratificazioni porta ad una resistenza non sufficiente del guscio finale. In questo caso è possibile che l'acciaio fuso rompa il guscio ceramico causando spesso la perdita dell'intero grappolo.

Generalmente vengono applicati dai 6 ai 12 strati con essiccazioni tra uno strato e l'altro che arrivano anche a 12 ore: ciò fa della formatura la fase più complessa da gestire in relazione ai tempi di lavorazione.

Per ogni stratificazione il grappolo viene dapprima immerso in un collante a base d'acqua che garantisce l'adesione del refrattario alla superficie, dopodiché viene posizionato in una cabina in cui viene ricoperto con il materiale corretto sotto forma di sabbia.

In Microcast, fino ai primi anni 2000 l'applicazione dei singoli strati avveniva manualmente.

Essendo la formatura una fase ripetitiva, pesante ed alienante, è quindi fortemente predisposta all'automatizzazione. Si è deciso quindi di installare due robot dotati di relative catene automatiche. (Figura 1.2.3).

Ogni grappolo è dotato di un'etichetta a barre che riporta i singoli cicli da eseguire; il robot preleva il grappolo dalla catena, ne legge l'etichetta ed esegue i movimenti prestabiliti tra le vasche di collante e le cabine per l'applicazione della sabbia.

Una volta completata l'operazione, il robot riposiziona il grappolo sulla catena scorrevole per l'essiccazione prevista.

Scarico della cera

Una volta completata l'ultima essiccazione, il grappolo è pronto per essere svuotato, in modo da creare lo spazio utile al riempimento dell'acciaio fuso.

Il grappolo viene posizionato in un'autoclave con la campana di alimentazione verso il basso.

Una volta azionata l'autoclave, l'apporto di calore fa sì che la cera all'interno del guscio ceramico si scioglia e sia scaricata per gravità all'interno dei bacini di stoccaggio alla base del macchinario.

Una volta scaricata la cera liquida viene estratta anche l'anima metallica del bastone.

La fase di scarico della cera è forse la più semplice da eseguire in tutto il processo ma allo stesso tempo è anche una fase critica.

Nel caso rimanga della cera intrappolata all'interno del guscio ceramico la conformità dei particolari finali potrebbe risultare compromessa.

E' perciò indispensabile progettare il montaggio anche in funzione della buona riuscita di questa operazione.

Fonderia

A questo punto il guscio ceramico ormai svuotato può essere portato nel locale fonderia per essere riempito con la lega prescelta.

Prima del riempimento lo stampo necessita di un aumento di temperatura ($\sim 1000^\circ\text{C}$) in forno per alcune ore: questa operazione innalza la temperatura di mantenimento dello stampo ceramico evitando così un'eccessiva escursione termica in fase di colata.

A questo punto lo stampo viene prelevato e posizionato sotto il crogiolo, dove avviene la colata per gravità e il conseguente riempimento del guscio ceramico. Tale azione è rappresentata in Figura 1.2.4.

Una volta avvenuta la colata, il grappolo viene raffreddato in aria.

In Microcast le colate avvengono solo per gravità e solitamente in atmosfera non controllata poiché le leghe utilizzate non necessitano di operazioni o ambienti complessi.

In funzione della lega, è possibile che la colata diventi molto più complessa di quanto descritto.



Figura 1.2.4: Riempimento dello stampo ceramico con acciaio liquido

Eliminazione del guscio ceramico

Una volta che il grappolo si trova a temperatura ambiente, il guscio ceramico deve essere eliminato.

A tal fine, nella fase di *distaffatura* si utilizzano varie tipologie di macchine, in funzione del livello di stratificazione del guscio e della fragilità intrinseca del materiale.

Solitamente basta l'azione di una macchina distaffatrice, la cui azione vibrante separa il metallo ormai solido dal refrattario, sbriciolandolo.

In alcuni casi è necessario utilizzare un martello pneumatico al fine di eliminare le zone più massive.

Alcuni particolari ammettono dei fori passanti con rapporto $\frac{\text{lunghezza}}{\text{diametro}}$ elevato o cave profonde: in questi casi la distaffatura non ha effetto positivo e il refrattario rimane adeso alla superficie dei pezzi.

In questi casi è necessario che i particolari siano trattati con un bagno di soda. Agendo da solvente, quest'ultima elimina il refrattario in eccesso. Solitamente questo passaggio viene effettuato una volta che i pezzi sono separati dal resto del grappolo, dopo la fase di troncatura.

Troncatura e sbavatura dei pezzi

Il grappolo è quindi pronto per essere tagliato al fine di separare i pezzi dal resto del cluster.

Tale operazione, detta comunemente *troncaura*, avviene tramite l'utilizzo di mole o di torce al plasma.

La frazione del grappolo troncato che non prosegue nel processo (il corrispettivo di bastone e runner) viene rottamato oppure riutilizzato nelle successive colate dello stesso materiale.

Una volta avvenuta la separazione, si rifiniscono i particolari eliminando la rimanenza degli attacchi di colata.

E' importante sottolineare che la condizione in cui i particolari vengono consegnati al cliente non è sempre corrispondente al grezzo di fusione. Nella maggior parte dei casi è richiesto uno o più trattamenti termici/superficiali oppure l'esecuzione di lavorazioni per asportazione di truciolo.

In questa descrizione generale tali fasi non sono né descritte né comprese poiché non sono utili ai fini di comprensione del processo.

Collaudo

Come è immaginabile, prima di spedire i particolari è necessario effettuare vari controlli al fine di certificare la conformità del prodotto.

Alcune controlli dipendono direttamente dalle direttive del cliente mentre altri sono a discapito del fornitore.

Per ogni item è previsto il controllo visivo della totalità dei pezzi prodotti e per verificare l'integrità del particolare o la sua conformità dimensionale in alcuni casi vengono eseguiti controlli non distruttivi aggiuntivi (*penetrant test, magnetic test, x-ray test, dimensional test*).

E' usuale che alcune geometrie (forcelle, piani di grandi dimensioni, mensole a sbalzo, etc.) si deformino durante il raffreddamento della lega all'interno del guscio o successivamente a causa delle tensioni residue.

Per questo motivo è importante considerare una fase di *raddrizzatura*: una volta individuate le geometrie critiche nelle prime produzioni, in questa fase ci si occupa di rilevare le deformazioni, e, nel caso queste non siano accettabili, i particolari vengono riportati ad una geometria conforme tramite apposite presse pneumatiche.

Dopo un ultimo controllo visivo statistico, i particolari sono pronti per essere spediti al cliente.

1.2.3 Pregi e difetti del processo

Al netto della descrizione del paragrafo precedente, che conferma la complessità processuale di questa tecnologia, se ne possono elencare pregi e difetti.

Innanzitutto la cera persa è una tecnologia che esiste da millenni e da quasi un secolo è utilizzata in campo industriale: ciò significa che si trovano facilmente materiali e macchinari, che pur essendo in continua evoluzione, sono ben collaudati e creati appositamente per tale processo. Il processo stesso, pur essendo formato da molteplici passaggi, è ormai ben collaudato e subisce modificazioni solo a fronte di casi particolari (leghe complicate da gestire o particolari con geometrie complesse da realizzare).

Le peculiarità del processo e in particolare la costruzione di uno stampo a perdere nelle modalità descritte, consente di ottenere particolari caratterizzati da geometrie anche molto complesse.

Tramite un'attenta progettazione dello stampo per l'iniezione si possono infatti ottenere modelli di grande complessità.

Un esempio interessante è la possibilità di realizzare le cavità di raffreddamento delle grandi palette per turbine a gas, ottenibili solo tramite la tecnologia di cera persa.

Tali cavità, e in generale qualsiasi sottosquadro interno può essere gestito in molti modi, ad esempio utilizzando un'anima ceramica, incollando più modelli insieme o progettando un sistema di carrelli nello stampo.

L'investment casting permette anche una finitura superficiale ottima e una buona precisione dimensionale che l'ha portata ad essere conosciuta anche come *fonderia di precisione* o *microfonderia*.

D'altro canto esistono alcuni difetti che fanno della fonderia a cera persa un processo notevolmente complesso da gestire.

Il processo è composto da un numero elevato di passaggi; ognuno di questi può produrre scarto.

Ciò deriva dal fatto che ogni step è caratterizzato da difficoltà proprie.

Un altro punto negativo è la lunghezza del processo dovuta dal numero elevato di fasi intermedie e dal tempo proprio di ognuna delle operazioni.

I costi di gestione sono anch'essi piuttosto alti, soprattutto per quanto riguarda la mano d'opera, che in alcuni reparti deve necessariamente essere molto specializzata.

In ultimo è necessario citare la gestione tecnica del prodotto: pur essendo vero che la precisione dimensionale è molto buona, il particolare passa da due ritiri (cera liquida → cera solida + acciaio liquido → acciaio solido) e ogni dimensione ritira in funzione di vari parametri.

Questo aspetto tecnico rende piuttosto complesso ottenere un particolare dimensionalmente conforme in tutte le sue quote; dell'argomento se ne discuterà più dettagliatamente durante la trattazione.

2 | LA FASE DI INIEZIONE

2.1 LA CERA, LA MATERIA PRIMA DELL'INIEZIONE

2.1.1 Considerazioni generali

Come detto nel Paragrafo 1.2.1, la cera e il suo utilizzo nella fonderia a cera persa sono legati storicamente all'arte scultorea; in particolare, la cera d'api fu il primo materiale termoplastico utilizzato dall'uomo.

La malleabilità di questo materiale era sfruttata per creare manualmente dei modelli che poi venivano riprodotti in bronzo o in altri metalli pregiati tramite il processo della cera persa.

Nell'industria odierna, la materia prima utilizzata mantiene il nome "cera" ma chimicamente ha poco a che vedere con l'originale; le caratteristiche fisiche si mantengono invece molto simili.

La cera utilizzata oggi per la fonderia è una miscela complessa, formata da diversi componenti.

Senza entrare nel dettaglio ¹, i componenti più utilizzati sono i seguenti:

- Paraffine
- Cera sintetica
- Resina sintetica
- Riempitivi organici
- Acqua

Differenti composti nella miscela danno origine a risultati con caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche molto differenti tra loro.

¹ La composizione chimica della cera ed eventuali dettagli a proposito dei vari componenti non sono utili allo svolgimento della tesi. Si consultino i riferimenti bibliografici [1, 2] se fosse necessario approfondire.

E' importante sottolineare anche che la maggior parte dei componenti elencati sono organici, quindi composti da catene di carbonio (esteri, resine naturali e sintetiche) che vengono legate tra loro o completate da molecole organiche di riempimento (*fillers*).

Generalmente, se la miscela è caratterizzata per lo più da composti a catene corte, il punto di fusione della cera è più basso come anche la durezza.

Incrementando la lunghezza media delle catene, si riscontra una considerevole variazione delle caratteristiche (aumento di durezza, viscosità, stabilità dimensionale, etc.).

Per interpretare le caratteristiche della cera è fondamentale tenere presente che il composto finale, qualsiasi esso sia, è formato da elementi diversi tra loro. Ciò fa sì che la cera si contraddistingua dalla maggior parte dei plastici a causa del manifestarsi di uno stato fisico intermedio tra liquido e solido.

Come si può osservare nel grafico in Figura 2.1.1, con l'aumento della temperatura, la cera passa gradualmente dallo stato solido a quello liquido attraversando una zona intermedia caratterizzata da comportamenti fisici diversi dai due stati agli estremi.

Aumentando gradualmente la temperatura, inizialmente il materiale si ammorbidisce rimanendo ancora solido. In questo stato, la risposta a trazione è quasi totalmente plastica: si parla infatti di *stato plastico*.

Man mano che la temperatura aumenta la cera diviene sempre più malleabile, passando dapprima ad uno *stato semi-plastico* fino a raggiungere un comportamento *semi-liquido*: l'intervallo intermedio nella sua interezza è definito comunemente *stato pastoso*.

Al raggiungimento del punto di fusione, il materiale diviene completamente liquido e si comporta come un qualsiasi fluido newtoniano.

Questo graduale cambiamento dello stato è provocato dalla compresenza di catene di lunghezza diversa, che ammettono punti di fusione differenti; con l'aumento della temperatura, vanno liquefacendosi catene di dimensioni sempre più elevate fino a raggiungere il momento in cui tutte si trovano in stato liquido.

Naturalmente, al variare della composizione, ogni composto ammette una sua curva caratteristica, ma tutte passano da questi stati intermedi.

Come per la durezza e più in generale per le caratteristiche legate alla resistenza meccanica, la temperatura e la composizione eterogenea influenzano fortemente anche contrazione/espansione del materiale.

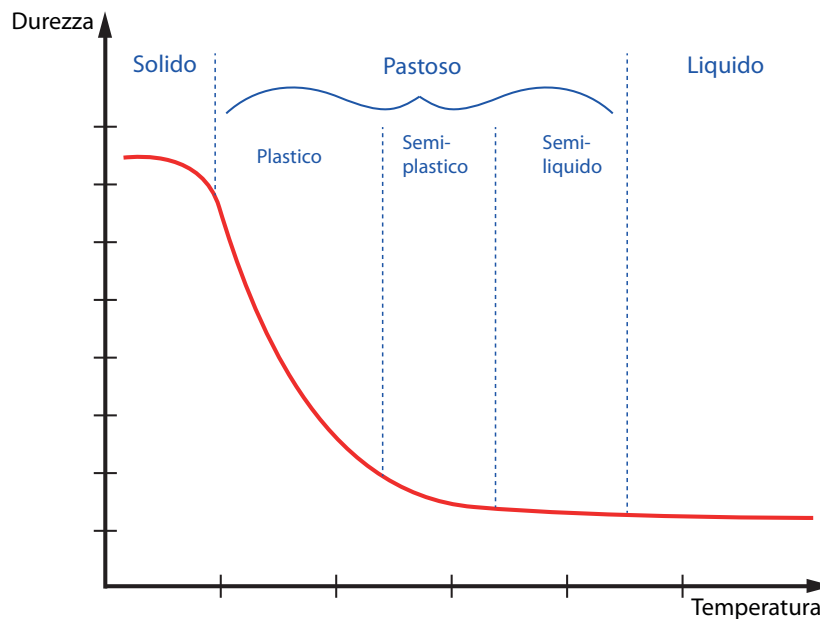


Figura 2.1.1: Rapporto qualitativo durezza/temperatura durante il passaggio di stato solido/liquido della cera

Ogni componente genera una differente modalità di espansione (o di contrazione) variando la temperatura ma, come nel ragionamento precedente e a meno di casi estremi, il comportamento è generalizzato e simile per tutte le tipologie di cera.

Anche in questo caso, la differenza di comportamento dato dalla diversa lunghezza delle catene di carbonio, crea un passaggio graduale tra la modalità di espansione in fase solida e quello in fase liquida.

In Figura 2.1.2 si confronta qualitativamente l'espansione della cera al variare della temperatura con l'espansione di un materiale perfettamente cristallino ed una resina (non cristallina); si nota fin da subito la differenza tra i comportamenti.

Il materiale cristallino è caratterizzato da un passaggio netto in corrispondenza del punto di fusione mentre per il materiale amorfo il trend è perfettamente lineare.

E' inoltre necessario sottolineare che la contrazione volumetrica relativa percentuale della cera dallo stato liquido a quello solido (comunemente detto *ritiro*) è piuttosto alto: per alcuni composti si arriva anche al 5%.

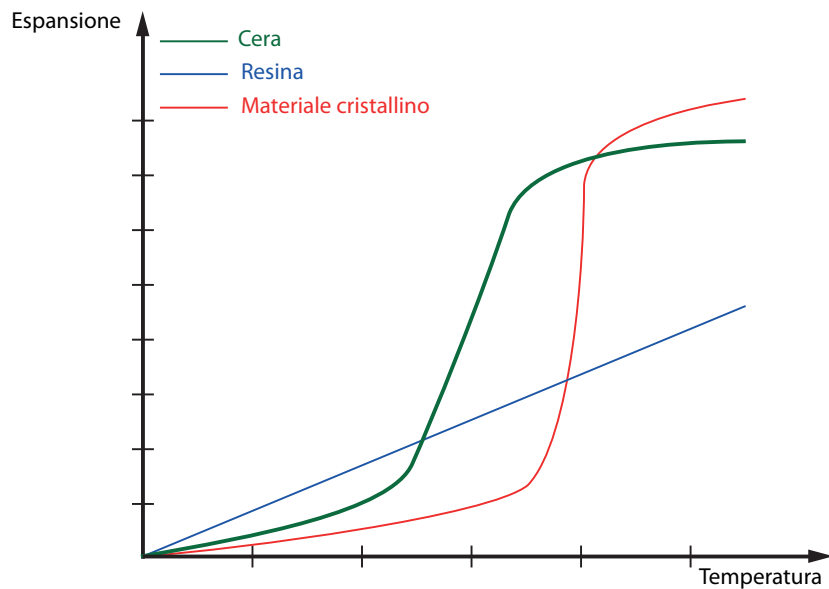


Figura 2.1.2: Rapporto qualitativo espansione/temperatura durante il passaggio di stato solido/liquido della cera

2.1.2 Caratteristiche fondamentali

Di seguito si riportano le caratteristiche fondamentali della cera intesa come composto, completate dalle rispettive definizioni.

Parametro	Descrizione
Punto di fusione	Temperatura in cui la prima goccia di cera liquida si stacca dalla massa principale del modello
Punto di congelamento	Temperatura alla quale la cera fusa smette di fluire
Contenuto di polveri	Percentuale di solidi non combustibili contenuti nel composto
Penetrazione	Distanza che un penetratore standard percorre verticalmente in un provino del materiale sotto precise condizioni standardizzate; funzione inversa della durezza
Viscosità cinematica	Misura del tempo che un volume fissato di cera liquida impiega per fluire attraverso un vaso capillare
Viscosità dinamica	Prodotto tra la viscosità cinematica e la densità del liquido

Come si leggerà successivamente (Sezione 2.2), al fine di mantenere la

conformità dei modelli è essenziale gestire la temperatura della cera lungo tutto il percorso che compie all'interno della pressa.

Entrambi i limiti di temperatura citati devono essere specificati (o per lo meno raccomandati) dal fornitore della cera. Essi, come il resto delle caratteristiche sopra elencate, variano a seconda della composizione del materiale.

Il medesimo discorso vale per il contenuto di polveri; in questo caso il fornitore è obbligato a misurare e riportare il contenuto percentuale massimo ammesso per ogni lotto di materiale consegnato.

2.1.3 Possibili classificazioni

Esistono diverse tipologie di cera iniettabili durante un processo di fonderia a cera persa. Alcune non sono però utilizzate per i modelli ma solo per il ricoprimento o l'iniezione dei runner, per cui la qualità superficiale non è un parametro essenziale.

In questo paragrafo ci si sofferma solo sulle tipologie relative all'iniezione dei modelli, la cosiddetta *pattern wax*.

Di queste si può effettuare la seguente classificazione:

- Cera non caricata (unfilled pattern wax)
- Cera emulsionata (emulsified pattern wax)
- Cera caricata (filled pattern wax)

La cera non caricata è composta da varie cere e resine ma ad essi non vengono aggiunti *fillers* di alcun tipo. Sono le meno costose e possono essere utilizzate anche per l'iniezione dei runner.

E' caratterizzata da una buona finitura superficiale; la composizione povera di riempitivi crea però dei problemi in fase di raffreddamento legati alle cavità di ritiro.

La cera emulsionata ha una base molto simile alla non caricata. La differenza principale è la presenza dell'acqua, che varia tra il 7% e il 12% del composto.

A causa della percentuale d'acqua nel composto, la finitura superficiale è ancora migliore della cera non caricata ed è meno soggetta ai problemi in raffreddamento.

Questo tipo di cera è molto più gestibile della precedente ed è molto usata in campo industriale.

Per quanto riguarda la cera caricata, si aggiungono riempitivi sotto forma di polveri insolubili che rendono il materiale molto stabile.

Tale tipologia di cera possiede una buonissima stabilità dimensionale e di forma: purtroppo l'aggiunta di fillers la rendono più costosa delle altre due.

Si può inoltre distinguere tra:

- Cera vergine
- Cera rigenerata

La cera vergine si autodefinisce: è un materiale mai iniettato prima.

Al contrario, la cera rigenerata ha alle spalle una o più iniezioni.

Come descritto a Pagina 15, la cera viene evacuata dallo stampo ceramico, raccolta e stoccata. Il materiale viene poi rispedito al fornitore della cera. Questi filtra la cera usata e la riporta ad una condizione simile allo stato iniziale.

Come è facilmente intuibile, la cera vergine è più costosa di quella riciclata. Ciò è attribuibile al fatto che ad ogni ciclo termico i legami delle catene degenerano e di conseguenza le caratteristiche della cera si discostano sempre più da quelle del materiale vergine.

A risentire di più della suddetta degenerazione sono caratteristiche come la viscosità (in aumento) e la finitura superficiale.

2.1.4 Il composto utilizzato per la sperimentazione

Microcast utilizza diversi tipi di cera per l'iniezione dei pattern. Durante la sperimentazione è necessario simulare il meglio possibile le condizioni di produzione: è dunque naturale scegliere il composto più utilizzato per affrontare la totalità delle prove.

Il prodotto in questione è un composto codificato come *RECLM+ADDMICR01*; trattasi di cera emulsionata (*emulsified pattern wax* rigenerata, ad alta viscosità ed alta rigidità, fornita dall'azienda *Blayson Olefines Ltd* con sede a Cambridge (UK).

Anche se questo preciso materiale è specifico per il processo Microcast, ne vengono utilizzati di molto simili in gran parte delle fonderie a cera persa europee, essendo questa una cera che associa buona stabilità dimensionale ad un costo contenuto.

In Tabella 2.1.1, si elencano le specifiche tecniche certificate dal fornitore.

Tabella 2.1.1: Caratteristiche del composto RECLM+ADDMICR01

Caratteristica	Range da rispettare	
	Min	Max
Ash value %	0	0,1
Penetration [mm]	0,9	1,5
Punto di congelamento [°C]	63	67
Punto di fusione [°C]	69	75
Contenuto acqua %	7	11
Viscosità [Pa · s]	0,4	1,2

In aggiunta il fornitore consegna una scheda di range consigliati riguardanti le temperatura di mantenimento prima di iniettare e per la fase di iniezione vera e propria (Tabella 2.1.2).

Tabella 2.1.2: RECLM+ADDMICR01: range di utilizzo per l'iniezione

Temperature	Range raccomandati	
	Min	Max
Mantenimento in serbatoio [°C]	70	80
Iniezione con cera pastosa [°C]	58	64
Iniezione con cera liquida [°C]	68	72

2.2 LO STAMPAGGIO AD INIEZIONE

2.2.1 Caratteristiche generali

Lo stampaggio ad iniezione è un processo industriale nel quale un materiale plastico viene iniettato ad elevate pressione e temperatura all'interno di uno stampo chiuso; questo viene poi aperto una volta che il materiale si è stabilizzato.

Tale processo è molto utilizzato sia per i materiali termoplastici sia per i materiali termoindurenti ed è in uso in Italia fin dai primi anni '50 in cui si è iniziato a produrre manufatti di plastica tramite presse manuali.

Nel tempo si è giunti a utilizzare presse completamente automatizzate a partire dal caricamento del materiale fino all'estrazione; l'intervento

umano è richiesto solo in caso di accensione, spegnimento ed eventuali problemi del sistema.

Le presse ad iniezione sono macchine tra le più diffuse nel campo della trasformazione dei plastici, in quanto oltre ad offrire una grande versatilità, sono di facile impiego.

La gamma di prodotti ottenibili è estesa come per nessun altro tipo di macchina per materie plastiche: si passa infatti dal particolare micrometrico fino a corpi di grandi dimensioni.

Come detto in precedenza, il composto utilizzato per la fase di iniezione durante il processo di Investment casting è a tutti gli effetti un materiale termoplastico anche se non necessita di un rimescolamento spinto come quello esercitato dalla vite di estrusione presente nelle presse per plastiche.

Inoltre, in questo caso interessano poco le qualità meccaniche del modello in quanto il pezzo in cera è solo un semilavorato che verrà successivamente distrutto per far posto alla lega metallica.

2.2.2 Le presse ad iniezione

Esistono diverse tipologie di presse ad iniezione per la cera. Possono essere divise in quattro gruppi a seconda del metodo di iniezione:

- Con cera liquida
- Con cera pastosa
 - *Canister*
 - A doppio stadio (liquida/pastosa)
- Con cera solida

Per quanto riguarda la prima tipologia, la cera viene liquefatta fino a raggiungere lo stadio di fluido newtoniano e viene iniettata nello stampo tramite un azionamento oleodinamico.

Per raggiungere una qualità ottimale e un buon livello di finitura superficiale, è necessario che la temperatura della cera nel serbatoio sia identica a quella all'ugello.

Il problema di questo tipo di presse è il tempo di raffreddamento: se la cera viene iniettata ad una temperatura elevata (~ 80 °C), è quindi necessario un raffreddamento e di conseguenza un tempo di iniezione più lunghi.

Un altro aspetto negativo riguarda il ritiro del materiale durante il raffreddamento: il valore percentuale del ritiro durante la solidificazione sarà tanto più elevato quanto sarà ampio il delta tra temperatura di iniezione e temperatura ambiente.

A tal proposito, maggiore è il ritiro, maggiori sono le difficoltà di progettazione del prodotto e dello stampo.

L'iniezione con cera pastosa sfrutta l'esistenza della caratteristico stato intermedio di questi composti.

Nelle presse Canister, che significa letteralmente "scatola metallica", un recipiente viene riempito con cera liquida e inserito in un ambiente controllato, in cui la temperatura di contenitore e cera vengono fatte scendere lentamente e uniformate ad un valore in cui si raggiunga lo stato pastoso. Una volta raggiunta la temperatura voluta (e quindi la consistenza adatta), si inietta la cera nello stampo.

Le presse a doppio stadio sono caratterizzate da un serbatoio in cui la cera è a temperatura diversa in funzione della posizione.

Nella zona superiore del serbatoio la cera mantiene la fase liquida ed una temperatura uguale o superiore al punto di fusione.

Nella zona prossima ai condotti che portano al gruppo di iniezione (zona inferiore del serbatoio), la temperatura è impostata ad un valore più basso; questo valore deve essere mantenuto fino all'ugello di entrata nello stampo.

I problemi relativi a questo tipo di iniezione sono molteplici. In particolare, le presse Canister sono caratterizzate da un processo laborioso e da un ingombro notevole.

Sono inoltre poco efficienti per quanto riguarda lo spurgo dell'aria e il riutilizzo della cera in eccesso nel recipiente.

L'iniezione a doppio stadio è invece un buon trade-off tra la Canister e la cera liquida, offrendo tempi più ristretti per il raffreddamento e una buona circolazione della cera nei circuiti. E' comunque necessario riporre grande attenzione allo spurgo del sistema e al controllo della temperatura nelle diverse zone della pressa.

L'ultima tipologia di presse è caratterizzata da un'iniezione a cera solida, in cui il materiale viene preriscaldato e iniettato ad una temperatura in cui la cera mantiene la sua forma.

La pressione esercitata nella zona dell'ugello abbassa la viscosità della cera quanto basta per un completo riempimento delle impronte dello stampo.

Quest'ultimo tipo di pressa è poco utilizzato per la difficoltà di utilizzo e la poca applicabilità ai pezzi più piccoli.



(a) Pressa ad iniezione orizzontale (MPI-45 automatic)

(b) Pressa C-frame (MPI-LC55 series)

Figura 2.2.1: I due diversi layout per le presse ad iniezione per la cera

Si può anche definire una categorizzazione in base al layout del macchinario. I due layout più utilizzati sono:

- Iniezione orizzontale
- C-frame

Il layout ad iniezione orizzontale è molto utilizzato nelle presse completamente automatizzate, che servono linee ad altissimi volumi di produzione.

Questo tipo di layout non permette un agile attrezzaggio; lo stampo (caratterizzato da una direzione di chiusura orizzontale) non può quindi essere smontato facilmente e in alcuni casi è fisso sulla pressa.

Il layout C-Frame, chiamato così per la tipica forma del corpo della macchina, è caratterizzato da una chiusura verticale dello stampo ed è il più popolare tra le macchine che prevedono frequenti attrezzaggi.

Si veda Figura 2.2.1 per osservare la differenza dei due layout.

Se si volesse approfondire l'argomento si consultino i riferimenti [1, 7, 4, 3].

2.2.3 La pressa ad iniezione LC55

Microcast possiede dal dicembre 2012 delle presse semiautomatiche *MPI-LC55*.

Queste presse sono caratterizzate da un layout C-frame e da un'iniezione ibrida a doppio stadio.

Tutte le caratteristiche tecniche sono visibili in Appendice [A](#) e in Figura [2.2.2](#) è presente una foto della pressa.

Per semplicità, d'ora in avanti ci si riferirà alle macchine in questione con la sigla *LC55*.



Figura 2.2.2: La pressa LC55 Micorcast

LC55 è progettata appositamente per il processo di Investment casting da *Mueller Phipps International*, azienda americana che rifornisce colossi come Mitsubishi e Rolls-Royce.

E' importante specificare che la pressa è necessariamente semiautomatica: il prelievo e il posizionamento dei modelli in cera sono infatti operazioni manuali ed è perciò necessaria la presenza di almeno un operatore per macchina.

Inoltre, la geometria del particolare a volte rende obbligata la presenza di carrelli manuali, azionabili solo in fase di prelievo o dopo di essa.

Ad ogni modo, la tecnologia avanzata dell'unità permette tempi costanti e registrabili.

Le presse sono dotate di un'unità computerizzata integrata che facilita la gestione dei parametri e più in generale l'utilizzazione del macchinario. Quest'ultima caratteristica aiuta in modo particolare l'utilizzatore inesperto che, come il sottoscritto, si avvicina senza un'esperienza giornaliera. Tali presse permettono inoltre la regolazione e la visione real-time di una lunga serie di input che altrimenti non sarebbe possibile isolare. Con l'utilizzo dell'unità computerizzata è anche possibile salvare e modificare tutti gli input impostati volta per volta, in modo da poter riutilizzare quel gruppo di valori all'occorrenza, come una sorta di ricetta culinaria. E' per questa ragione che in azienda i singoli file vengono chiamati informalmente *ricette*. E' inoltre importante sottolineare che, essendo le presse LC55 più avanzate ed utilizzate rispetto alle altre, si prevede saranno le più produttive nel medio-lungo periodo. E' perciò ragionevole utilizzarle per tutta la fase di sperimentazione del progetto aziendale.

La struttura della pressa

Si andrà ora a descrivere la fase di iniezione passo-passo seguendo la struttura della pressa. In questo modo si chiariscono i singoli passi del processo, seguendo ciò che realmente esegue la macchina o/e l'operatore. LC55 è composta da tre unità principali distinguibili tra loro:

- Serbatoio
- Gruppo d'iniezione
- Gruppo di chiusura

Ovviamente, la pressa è composta anche da un impianto elettrico e dall'impianto di raffreddamento ad acqua. Il tutto è coadiuvato da un sistema di controllo che fa capo all'unità computerizzata integrata.

Le tre unità sono evidenziate in uno schema semplificato della macchina in Figura 2.2.3.

La cera solida a temperatura ambiente in forma di sferette di pochi millimetri di diametro è caricata in un *melter*, che ha la funzione di mescolare e scaldare il materiale.

Dopodiché il materiale ricade nel serbatoio ad una temperatura prossima a quella di fusione della cera.

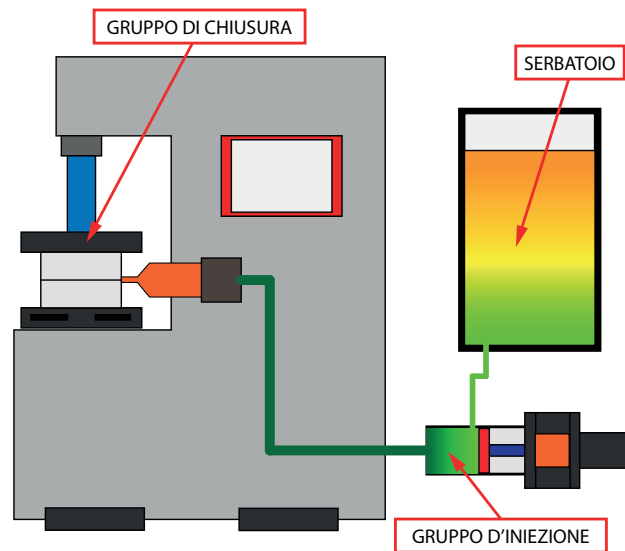


Figura 2.2.3: Schema della pressa LC55

La cera che staziona nella zona alta del serbatoio viene quindi portata a fusione tramite l'apporto di calore e movimentata con un agitatore, al fine di rendere il materiale uniforme.

Per effetto della diversa densità e della differenza di temperatura, la cera più calda (e quindi più vicina allo stato liquido) si trova nella zona alta del serbatoio mentre la cera più fredda si sposta nella zona bassa, vicino all'ugello di scarico al gruppo d'iniezione.

In generale, la serie LC55 ammette due diversi serbatoi, in modo da poter iniettare con due diversi materiali, in funzione soprattutto del grado di precisione dimensionale richiesta.

Nel caso di Microcast, si è deciso di avere la versione dotata di un unico serbatoio dato che, a parte casi isolati, la tipologia di cera utilizzata è una soltanto.

Il gruppo del serbatoio è collegato al cilindro di iniezione tramite delle tubazioni e la ricarica del cilindro, o *refeel*, è effettuata per ogni ciclo di iniezione durante il prelievo dei modelli.

E' possibile regolare la temperatura del serbatoio in due diversi punti, controllando e registrando così le condizioni della cera liquida e di quella già in stato pastoso subito prima dell'inizio del ciclo di iniezione.

In fase di iniezione, la cera passa nel gruppo d'iniezione e viene quindi movimentata da un sistema oleodinamico: il pistone forza la cera nel

sistema di condotti diretti allo stampo.

E' qui regolata la pressione dell'olio che spinge il pistone: di conseguenza viene variata la posizione del pistone stesso all'interno del cilindro. In questo modo si controlla di fatto l'afflusso di materiale in uscita dal cilindro, parametro fondamentale per la sperimentazione.

Un'altra particolarità di LC55 riguarda la redistribuzione del flusso. In generale, posto un sistema così descritto, se viene impostata una certa pressione all'olio del cilindro, da essa derivano un certo valore di velocità del pistone e un conseguente valore di portata uscente.

Nel caso in esame il sistema ammette l'utilizzo di una valvola di sfogo a valle del serbatoio, controllata automaticamente dal sistema.

Tale valvola permette di impostare separatamente la pressione del cilindro e la portata di cera entrante nello stampo, misurata all'ugello.

Il materiale in eccesso viene convogliato in una tubazione di scarico che conduce al serbatoio principale.

Questa possibilità viene sfruttata soprattutto al fine di diversificare la pressione della cera in ingresso dalla pressione di mantenimento durante il raffreddamento. Infatti, grazie a questo sistema la pressione esercitata dal pistone viene sfruttata completamente solo in fase di impaccamento della cera.

In questo modo si massimizza la pressione a monte della valvola di spurgo, riducendo così la possibilità di aria nel sistema ed eventuali problemi legati allo spurgo della cera in stato pastoso.

Il gruppo di chiusura ha il compito di mantenere in posizione lo stampo al momento dell'afflusso della cera e di movimentare il semi-stampo superiore durante gli intervalli di chiusura ed apertura.

Il sistema deve sopportare la pressione data dalla cera liquida in entrata; è perciò applicata una forza di chiusura al semi-stampo superiore tramite la spinta di un azionamento oleodinamico comandato dal sistema centrale.

Il pistone agisce su una piastra mobile la quale è fissata al semi-stampo superiore.

A stampo chiuso, la cera liquida fluisce tramite un ugello posizionato lateralmente, a livello della linea di divisione tra i semi-stampi, in corrispondenza dell'apposito foro di entrata.

Una volta completato il raffreddamento, dopo l'apertura dello stampo, la pressa aziona il sistema di estrazione.

Questo è posizionato sotto il semi-stampo inferiore ed è composto da un azionamento meccanico che movimentata gli estrattori dello stampo, spingendoli verso l'alto.

Gli estrattori sono dei corpi allungati solitamente di ottone, caratterizzati da una sezione circolare o rettangolare; si muovono parallelamente alla direzione di apertura dello stampo.

Se posizionati correttamente, la loro azione spinge verso l'alto il complesso dei modelli in cera nello stampo, permettendo il prelievo all'operatore. Tutto il ciclo è comandato da sistema integrato della pressa; l'unità computerizzata dà accesso a tutti i parametri necessari al sistema tramite un'interfaccia grafica.

2.2.4 Il ciclo di iniezione

Per meglio descrivere la fase di iniezione è essenziale comprendere che si tratta di un vero e proprio ciclo continuo di operazioni, scandite da momenti ben definiti.

E' necessario suddividere questo ciclo nelle singole operazioni che la compongono e ordinarle in una freccia temporale.

Tabella 2.2.1: Elenco degli istanti che compongono il ciclo di iniezione

Istante	Descrizione
t_0	Avvio discesa semi-stampo superiore
t_1	Chiusura stampo
t_2	Inizio avvicinamento ugello allo stampo chiuso
t_3	Fine corsa ugello (inserimento nello stampo)
t_4	Avviamento flusso cera
t_5	Interruzione flusso cera
t_6	Inizio arretramento ugello
t_7	Azzeramento della pressione di clampaggio
t_8	Inizio arretramento carrelli manuali, se presenti
t_9	Fine arretramento carrelli manuali
t_{10}	Avvio apertura stampo
t_{11}	Fine apertura stampo
t_{12}	Inizio estrazione cera (movimento degli estrattori automatici)
t_{13}	Fine estrazione cera
t_{14}	Prelievo modelli
t_{15}	Eventuali azioni su cere/stampo (recupero difetti, applicazione distaccante, posizionamento raffreddanti, etc.)
t_{16}	Posizionamento cere su pianale
t_{17}	Inizio ritorno estrattori in posizione di iniezione
t_{18}	Fine ritorno estrattori

Un ciclo è periodico per definizione; il momento iniziale è quindi relativo. In questa trattazione si è deciso di imporre come istante iniziale il momento in cui viene avviata la discesa del semi-stampo superiore.

In Tabella 2.2.1 viene riportata la sequenza degli istanti che compongono il ciclo di iniezione.

Tra un istante e l'altro, gli intervalli di tempo possono durare pochi decimi di secondi o anche alcuni secondi.

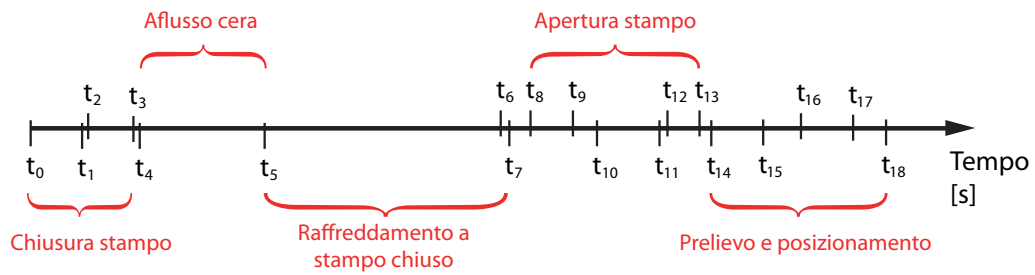


Figura 2.2.4: Un periodo completo del ciclo di iniezione

Nel grafico in Figura 2.2.4 sono riportati tutti gli istanti sopra citati completati dagli intervalli che li separano, scalati in modo da dare un'idea dell'importanza dell'intervallo.

Riassumendo ciò che viene descritto in Figura 2.2.4:

Intervallo	Descrizione
$t_0 \rightarrow t_3$	Chiusura stampo
$t_4 \rightarrow t_5$	Afflusso cera
$t_5 \rightarrow t_7$	Raffreddamento a stampo chiuso
$t_8 \rightarrow t_{13}$	Apertura stampo
$t_{14} \rightarrow t_{18}$	Prelievo e posizionamento modelli

Il periodo del ciclo totale è chiamato *battuta* o *cycle time* e varia per ogni stampo iniettato.

In alcuni casi (ad esempio tra t_3 e t_4) non è definito nessun intervallo poiché questi sono stati ritenuti poco significativi per la trattazione.

Tali intervalli sono tempi tecnici della pressa, non influenzabili dalle decisioni dell'operatore: prendono in totale solo pochi decimi di secondo.

Gli intervalli di chiusura ed apertura stampo, pur essendo importanti dal punto di vista delle tempistiche ed essenziali nello svolgimento del ciclo, almeno per quanto riguarda questa trattazione, non sono parametri migliorabili.

I tempi e i metodi con cui viene aperto e chiuso lo stampo, esclusi pochi casi particolari, sono a totale appannaggio del sistema della pressa e tali rimarranno durante gli esperimenti. Variare i parametri relativi a questi intervalli significherebbe riprogrammare il sistema operativo della pressa utilizzata per la sperimentazione.

Un discorso simile vale per l'intervallo di prelievo e posizionamento dei modelli in cera: tale intervallo dipende da vari parametri dei quali i più importanti sono sicuramente il fattore umano e la progettazione dello stampo.

Per quanto riguarda il fattore umano, la soluzione è la standardizzazione delle operazioni da eseguire in funzione dello stampo da iniettare e dell'esperienza del singolo operatore.

Anche in questo caso tali operazioni sono però al di fuori di ciò che si vuole realizzare.

D'altro canto è fondamentale anche l'aspetto inerente alla progettazione dello stampo; tra i suoi compiti, il progettista deve considerare l'ottimizzazione del prelievo da parte dell'operatore.

Ad ogni modo, la bontà di una progettazione è una variabile troppo complessa che richiederebbe un lavoro a parte.

Come si vedrà nella Sezione 3.2, i parametri legati alla progettazione dello stampo sono rilevati come variabili misurabili ma non modificabili.

In conclusione, gli unici intervalli che si prenderanno in considerazione durante la trattazione sono quelli relativi alla presenza della cera nello stampo:

Intervallo	Descrizione
$t_4 \rightarrow t_5$	Afflusso cera
$t_5 \rightarrow t_7$	Raffreddamento

Questi due intervalli sono sicuramente i più importanti in relazione alla gestione dei tempi della fase di iniezione.

Non considerando i casi di stampi con estrazione manuale complessa, la somma di questi due intervalli risulta più del 50% del periodo totale del ciclo.

I valori di questi due intervalli di tempo e la regolarità di tali valori sono variabili importanti della conformità dei modelli in cera e per i costi di produzione.

In relazione a questa affermazione, minimizzare la somma di questi due tempi è uno degli obiettivi di questa trattazione, unitamente al mantenimento della conformità dei modelli iniettati.

3

LE VARIABILI DI PROGETTO

In questo capitolo si vanno a descrivere i parametri che intervengono nel progetto aziendale, al netto dei concetti espressi nelle precedenti sezioni. Conoscendo le basi dello stampaggio ad iniezione e delle caratteristiche della pressa utilizzata per la sperimentazione, è possibile circoscrivere il gruppo di variabili utili allo svolgimento dell'intera serie di operazioni che forma il progetto descritto.

In una prima parte del capitolo vengono descritti i parametri d'iniezione, fondamentali in quanto sono le uniche variabili modificabili durante la sperimentazione.

La definizione di tali parametri è utile per comprendere la totalità delle variabili che si possono sfruttare durante il progetto.

Nella seconda sezione ci si concentra sulla definizione dei parametri misurabili, a partire dal concetto fondamentale di *conformità del modello in cera*.

Tale concetto generale è alla base delle definizioni dei vari tipi di non conformità riscontrabili su di un modello in cera; questi ultimi sono funzione anche dei vari parametri misurabili qui sviluppati.

Il gruppo di variabili in questione è stato attentamente selezionato grazie soprattutto all'esperienza tecnica maturata in azienda. Osservando per anni gli aspetti legati alla conformità dei modelli è stato possibile legare la teoria dei libri alla pratica di tutti i giorni.

I libri di testo utilizzati come riferimento come [1] esprimono spesso dei legami tra la presenza di una specifica difettologia e una caratteristica del particolare o dell'iniezione.

Esistono inoltre alcuni articoli (tra i quali si consultino i riferimenti [8, 9]) che cercano di riportare delle caratteristiche misurabili di un modello (rugosità, durezza, stabilità dimensionale) con i parametri di iniezione.

Al contrario, non è stato possibile trovare riferimenti che si occupano di caratterizzare la conformità come è stato fatto in questo capitolo. In questa sezione è stata quindi costruita un'analisi della conformità che porta qualcosa di nuovo al settore dell'investment casting, anche se la

sua consistenza potrà essere provata (o contraddetta) solo in un momento successivo a questa trattazione.

L'intero progetto dipende dalle definizioni e dalle scelte riportate in questo capitolo, sebbene i parametri misurabili definiti non saranno molto sfruttati durante il proseguo della trattazione.

Tali parametri saranno utili soprattutto durante le fasi successive del progetto, in quanto saranno alla base della codificazione dei singoli item per la realizzazione dell'algoritmo descritto nel capitolo introduttivo.

La totalità dei parametri descritti in questo capitolo è riportata in Appendice [B](#).

3.1 I PARAMETRI D'INIEZIONE

Ogni pressa è in grado di controllare vari parametri inerenti all'operazione di iniezione dei modelli in cera. In questa sezione ci si concentra sui parametri modificabili disponibili sull'interfaccia della pressa LC55.

Una volta elencate e descritte, si selezionano i parametri che compongono il gruppo delle variabili modificabili per la sperimentazione.

LC55 è in grado di controllare diversi parametri. Questi possono dividere nei seguenti tre gruppi:

- Parametri di temperatura
- Parametri di pressione
- Parametri di tempo

Oltre alla regolazione dei parametri, l'unità permette di visualizzare tutte le variabili modificabili in *real time* tramite i valori misurati durante il ciclo.

In questo modo è possibile verificare che la macchina non si discosti dalle condizioni prestabilite. Nel caso succeda, l'operatore è in grado di modificare qualsiasi parametro agendo direttamente sull'interfaccia.

E' inoltre possibile seguire dei grafici in costante aggiornamento sull'evoluzione della pressione e del flusso durante il ciclo. Tali grafici permettono una visualizzazione puntuale degli eventuali scompensi e i trend dei parametri fondamentali, a volte non rilevati dalla schermata che riporta i valori numerici.

Per ogni tipologia di parametro verrà riportata una tabella contenente una breve descrizione dei parametri modificabili direttamente dall'interfaccia della pressa; l'unità di misura riportata per ogni parametro è quella utilizzata dal sistema.

3.1.1 Parametri di temperatura

La regolazione della temperatura della cera è di grande importanza per l'ottenimento della conformità di un modello; è quindi essenziale poter gestire i minimi cambiamenti di temperatura nelle zone chiave dell'impianto.

Il sistema di LC55 è in grado di misurare e gestire la temperatura della cera in varie zone della pressa. Per ogni zona si può regolare un differente parametro.

Tali parametri (appunto uno per zona) sono riportati in Tabella 3.1.1 mentre in Figura 3.1.1 viene mostrata la posizione delle zone descritte in Tabella.

Tabella 3.1.1: Parametri di temperatura modificabili, associati alle diverse zone della pressa

Zona	Parametro	Descrizione
1	T_{S1} [°C]	Temperatura della zona più calda del serbatoio, dove la cera è in stato liquido; essa deve rimanere a temperatura costante durante l'esercizio.
2	T_{S2} [°C]	Temperatura della parte del serbatoio più vicina al gruppo iniettivo e perciò meno elevata; in questa zona la cera è in stato pastoso.
3	T_{cil} [°C]	Temperatura della cera una volta nel cilindro d'iniezione
4	T_{tb} [°C]	Temperatura della cera all'interno delle tubazioni tra gruppi d'iniezione e chiusura.
5	T_{ug} [°C]	Temperatura della cera all'ugello tra pressa e stampo.
6	T_{ps} [°C]	Temperatura della piastra superiore; è legata alla temperatura di mantenimento del semi-stampo superiore.
7	T_{pi} [°C]	Temperatura della piastra inferiore; è legata alla temperatura di mantenimento del semi-stampo inferiore.

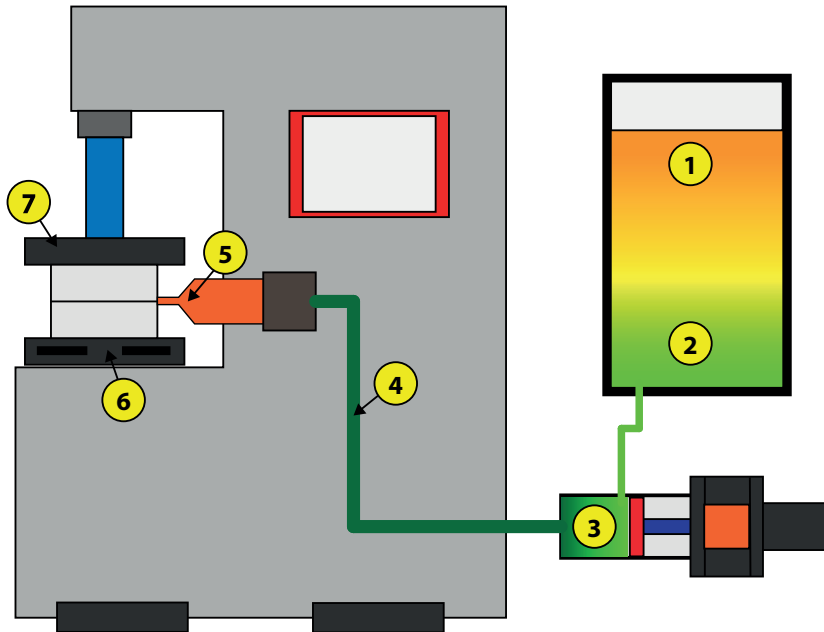


Figura 3.1.1: Raffigurazione dell'impianto di iniezione di LC55

Anche se potenzialmente modificabili tramite l'interfaccia della pressa, alcuni di questi parametri devono essere mantenuti su valori consigliati o predefiniti.

Il più importante in questo senso è T_{S1} : la temperatura della parte alta del serbatoio deve essere mantenuta costante durante la produzione per questioni di qualità del processo; tale istruzione è ribadita dal fornitore della cera.

La temperatura consigliata è mantenuta costantemente in controllo durante la produzione su LC55 e non deve discostarsi dal seguente valore standard:

$$T_{S1\text{std}} = 75^{\circ}\text{C} \quad (3.1.1)$$

Un altro fattore da considerare è il mantenimento della temperatura durante il percorso della cera in stato pastoso dalla zona inferiore del serbatoio fino all'ugello.

Il fornitore della cera e la casa produttrice dell'impianto consigliano di non variare la temperatura durante tale percorso al fine di evitare modificazioni della viscosità con relativi scostamenti dalla pressione misurata al cilindro.

Per rafforzare questa posizione, l'interfaccia standard della pressa raggruppa i parametri inerenti a tale percorso e ne permette la modifica come se si trattasse di un'unica variabile; solamente bypassando alcuni avvisi è possibile modificare i parametri separatamente.

Durante il progetto si manterrà quindi l'uguaglianza tra i fattori che descrivono le temperature di tale percorso:

$$T_{S2} = T_{cil} = T_{tb} = T_{ug} \quad (3.1.2)$$

La situazione descritta per le temperature inerenti al percorso della cera è identica a quella riguardante la temperatura delle due piastre.

E' consigliabile che il semi-stampo superiore abbia una temperatura identica al semi-stampo inferiore poiché si cerca di escludere comportamenti diversificati della cera durante il contatto con le due superfici opposte.

Il sistema integrato della pressa permette la modifica di questi fattori in modo indipendente (sempre tramite bypass di un avviso), soprattutto per consentire degli aggiustamenti in tempo reale agli operatori, nel caso vi siano degli scompensi momentanei nella temperatura di mantenimento.

Si mantengono quindi le due temperature delle piastre come di seguito:

$$T_{Ps} = T_{Pi} \quad (3.1.3)$$

3.1.2 Parametri di pressione

Qualsiasi pressa ad iniezione necessita di gestire la portata di materiale in ingresso nello stampo. Solitamente questo aspetto è regolato da un parametro legato alla pressione del cilindro oleodinamico a valle del serbatoio.

Nel caso di LC55, per regolare la portata di materiale, il sistema fornisce tre diversi metodi di approccio al problema:

MOD1 Single flow

MOD2 Time based flow

MOD3 Volume based flow

Mod1 è il più semplice dei tre da gestire: vengono impostate il valore della pressione dell'olio del cilindro (P) e la portata della cera misurata all'ugello (q).

A livello fisico esiste una dipendenza tra questi due parametri, ma in realtà, come si è riportato a Pagina 32, tra il cilindro e l'ugello è posizionata una valvola di sfogo che riconduce al serbatoio principale della cera. Il parametro P si riferisce perciò alla condizione della pressione della cera prima della posizione di tale valvola mentre il parametro q è una misura della portata all'ugello (quindi dopo la valvola): è perciò possibile comandare entrambi i parametri indipendentemente. Come detto in precedenza, la pressione P è completamente sfruttata solo ad avvenuto riempimento dello stampo, cioè in fase di impaccamento del materiale.

I parametri modificabili di pressione sono riportati in Tabella 3.1.2.

Tabella 3.1.2: Parametri di pressione modificabili sulla pressa

Parametro	Descrizione
q [cm ³ /s]	Portata di materiale iniettato misurata all'ugello.
P [bar]	Pressione data dal cilindro di iniezione. Corrisponde alla pressione utilizzata per impaccare la cera una volta che è terminato l'afflusso.

Gli altri due approcci sono più complessi rispetto a *Mod1*: entrambi sfruttano dei passaggi intermedi con livelli di portata differenti.

Brevemente, *Mod2* è caratterizzato da un approccio *time based*, ossia, per ogni passaggio vengono impostati un valore di portata e un valore di tempo.

Diversamente, *Mod3* è *volume based* e per ogni passo vengono impostati un valore di portata e uno di volume di cera da iniettare.

In ogni caso, questi due modalità di iniezione non vengono mai utilizzati in produzione e sono comunque stati progettati per la gestione dell'iniezione di stampi di grande complessità.

Si è perciò deciso a priori di non prenderli in considerazione per lo meno per questa fase del progetto: descriverli in modo più approfondito non è perciò nell'interesse di questa trattazione.

3.1.3 Parametri di tempo

I parametri descritti in questo paragrafo sono dedicati alla regolazione delle tempistiche del ciclo di iniezione. Il sistema permette la gestione di tre parametri diversi, riassunti in Tabella 3.1.3.

Tabella 3.1.3: Parametri di tempo modificabili sulla pressa

Parametro	Descrizione
Δt_i [s]	Intervallo di tempo che descrive il periodo di afflusso della cera nello stampo.
Δt_r [s]	Intervallo di tempo che intercorre tra il momento finale di Δt_i e il momento in cui lo stampo si apre; in questo intervallo viene mantenuta la pressione P.
Δt_{pt} [min]	Intervallo di tempo minimo di inattività della pressa prima di un attivazione dello spurgo prestabilito del sistema. Se la macchina rimane inattiva per un tempo uguale o superiore, quando viene ripreso l'esercizio verrà effettuato uno spurgo automatico completo delle condutture.

E' necessaria un'osservazione riguardante la divisione tra i diversi tempi: in realtà δt_i non descrive esattamente il tempo di afflusso cera come era stato descritto nel Paragrafo 2.2.4.

Il volume da riempire di uno stampo è una costante: è quindi il valore della portata (q) che definisce in quanto tempo la cera colmerà la cavità. Per chiarire il problema vengono definite o richiamate le variabili in Tabella 3.1.4.

Tabella 3.1.4: Variabili legate al tempo di iniezione

Parametro	Descrizione
Δt_{riemp} [s]	Intervallo di tempo necessario al riempimento dello stampo
V_{st} [cm ³]	Volume totale della cavità dello stampo
q [cm ³ /s]	Portata misurata all'ugello

L'intervallo di tempo necessario allo riempimento è calcolabile come di seguito:

$$\Delta t_{riemp} = \frac{V_{st}}{q} \quad (3.1.4)$$

A fronte di questo ragionamento, se Δt_i fosse uguale a Δt_{riemp} , esso sarebbe dipendente dal parametro q.

In realtà Δt_i è un parametro indipendente anche se poco utile alla definizione del ciclo di iniezione.

Ammettendo che $\Delta t_i > \Delta t_{riemp}$, una volta che lo riempimento è completo entra in gioco la pressione P , la quale è costante fino all'apertura dello stampo. Ciò significa che nulla varierà per tutto il Δt_i restante e per la totalità di Δt_r .

Si osservino in Figura 3.1.2 i grafici dei diversi andamenti di portata e pressione durante lo riempimento per una migliore comprensione del problema descritto.

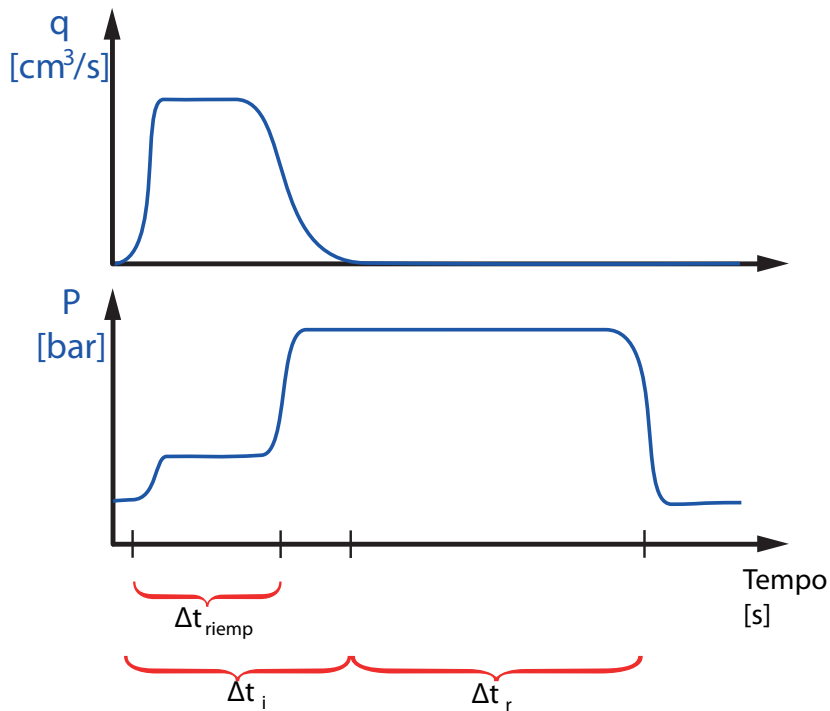


Figura 3.1.2: Andamento qualitativo nel tempo di portata e pressione durante il riempimento dello stampo

3.1.4 Selezione delle variabili modificabili

Secondo quanto si è espresso precedentemente, i parametri d'iniezione sono le uniche variabili modificabili dell'intero progetto.

Alla luce di quanto riportato in questa sezione è possibile tracciare un andamento qualitativo dei diversi parametri modificabili durante il ciclo di iniezione al fine di avere un'idea di cosa realmente accade.

In Figura 3.1.3 sono appunto tracciati gli andamenti qualitativi nel tempo della temperatura e del flusso della cera all'ugello (rispettivamente T_{ug} e q) e della pressione dell'olio a monte del cilindro d'iniezione (P).

Tra i parametri descritti è quindi necessario valutare accuratamente quali utilizzare: in questo paragrafo si prendono in considerazione le variabili descritte e si ragiona su un loro utilizzo durante la sperimentazione.

Utilizzare tutti i parametri descritti porterebbe portare ad una sperimentazione appesantita dalle troppe variabili in ingresso. Al contrario, utilizzandone troppo poche, i modelli ricavati potrebbero essere insufficienti a descrivere il fenomeno.

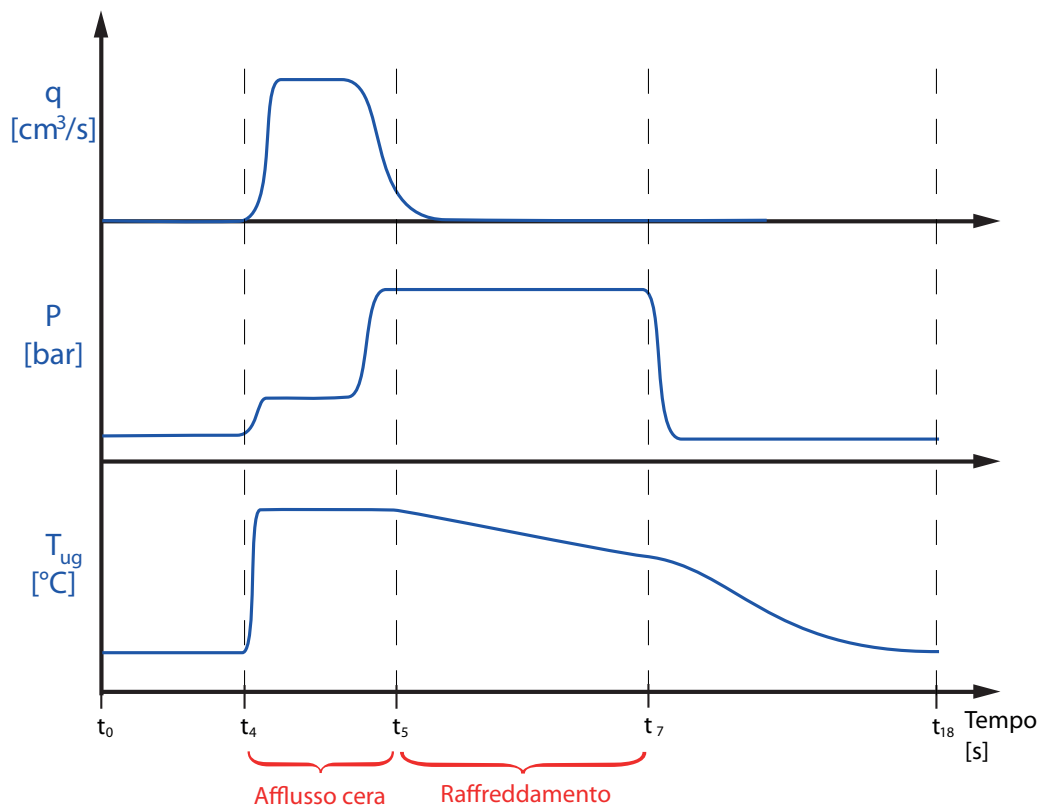


Figura 3.1.3: Andamento qualitativo dei parametri durante il ciclo di iniezione

Parametri di temperatura

Rifacendosi ai ragionamenti espressi nel Paragrafo 3.1.1, il progetto può comprendere solo due parametri modificabili (T_{S1} è definita come una costante).

Entrambi questi parametri potrebbero essere fondamentali per la modellazione di questo processo; è perciò necessario mantenerli entrambi attivi nel proseguo del progetto.

D'ora in poi i due parametri di temperatura modificabili sono definiti come di seguito:

$$\begin{cases} T_1 = T_{S2} = T_{cil} = T_{tb} = T_{ug} \\ T_2 = T_{Ps} = T_{Pi} \end{cases} \quad (3.1.5)$$

In fase di sperimentazione dovrà essere considerato che entrambe le variabili di temperatura non sono parametri che possono variare nell'immediato.

Per entrambi questi parametri, una variazione di pochi gradi comporta un tempo di attesa per il regime.

Nel caso di T_1 il transitorio passa attraverso la variazione di temperatura di tutta la parte bassa del serbatoio della cera, mentre per quanto riguarda T_2 , è l'acciaio delle piastre di chiusura che deve stabilizzarsi sulla temperatura indicata.

Le variazioni di entrambi i parametri sono regolate da un apposito impianto di raffreddamento a ricircolo continuo che aiuta a diminuire il tempo del transitorio: l'acqua dell'impianto scorre a circa 15°C.

I transitori del parametro T_1 sono piuttosto veloci (circa 10 min per 1°C di variazione): la variazione viene assistita dall'utilizzo di un agitatore all'interno del serbatoio che consente un ulteriore ricircolo.

L'acciaio delle piastre possiede un indice di conducibilità termica di molto migliore della cera ma la minima differenza tra T_2 e la temperatura dell'acqua di raffreddamento non consente una regolazione veloce del parametro.

T_2 presenta un ulteriore problema: la pressa gestisce la temperatura delle piastre di chiusura ma è la temperatura dello stampo la variabile associata interessante ai fini sperimentali.

Ciò significa che non è sufficiente che le sole piastre vadano a regime: è necessario che vadano in temperatura anche i due semi-stampi.

Non avendo dei sensori integrati che misurano tale temperatura, durante la sperimentazione si utilizzerà un termometro laser.

Durante esperimenti precedenti a questa trattazione si è stimato che per T_2 è necessario un tempo di attesa di 30 min per 1°C di variazione.

Parametri di pressione

Come preannunciato nel Paragrafo 3.1.2, si esclude l'utilizzo dei due approcci più complessi. Per la parte di progetto riportata in questa trattazione viene sfruttato il solo *Mod1*.

Questi ammette solamente i parametri P e q , due variabili indipendenti che non possono assolutamente essere escluse dalle successive analisi.

Parametri di tempo

Riprendendo i dati in Tabella 3.1.3, i parametri d'iniezione legati al tempo modificabili sono i seguenti:

Parametro	Descrizione
Δt_i [s]	Intervallo d'iniezione
Δt_r [s]	Intervallo di raffreddamento
Δt_{pt} [min]	Purge time (spurgo prestabilito)

E' già stato riportato quanto la gestione dei parametri di tempo sia essenziale per ottenere un modello in cera conforme. Inoltre, il fine di questa trattazione è ottimizzare il *cycle time* in modo da ottenere la conformità con i tempi più bassi possibili.

Viene da se che è necessario mantenere attivo almeno un parametro temporale per tutta la durata della sperimentazione.

Rifacendosi al ragionamento sulla definizione di Δt_i a Paragrafo 3.1.3, si può sostenere che è non è indispensabile mantenere separati i parametri Δt_i e Δt_r .

L'intervallo di riempimento dello stampo è infatti definito dal parametro q .

E' possibile considerare come variabile sperimentale legata al tempo la somma tra di essi.

Durante la sperimentazione sarà però necessario impostare separatamente i due parametri in quanto il sistema integrato della pressa li richiede.

Alla luce di queste ipotesi, non importa quale sia il valore di Δt_i purché sia maggiore del tempo di riempimento calcolato nell'Equazione 3.1.4. Ciò si rende necessario per ovvi motivi: con un tempo minore il riempimento non sarebbe totale e le impronte non risulterebbero complete (e quindi non conformi).

Il valore di Δt_r sarà dipendente dalla differenza dei primi due.

Con le seguenti equazioni si definiscono il parametro e il vincolo descritti precedentemente:

$$\Delta t_{tot} = \Delta t_i + \Delta t_r \quad (3.1.6)$$

$$\Delta t_i > \frac{V_{st}}{q} \quad (3.1.7)$$

$$\Delta t_r = \Delta t_{tot} - \Delta t_i \quad (3.1.8)$$

Durante il resto della trattazione, il parametro che somma i due tempi macchina viene chiamato t_{tot} invece che Δt_{tot} al fine di alleggerire la scrittura.

Da questo punto in poi in poi non si riporta più la divisione tra i parametri Δt_i e Δt_r : durante la preparazione alla sperimentazione sono stati automaticamente imposti i vincoli descritti.

In ultimo, il parametro legato al tempo di spurgo (Δt_{pt}) non viene preso in considerazione, poiché non ci sono motivi per modificare lo standard. I tempi impiegati per un ciclo di spurgo e i costi relativi ad esso sono poco decisivi se messi a confronto all'interesse dei tempi dedicati alla produzione.

Spurgare il sistema ogni 5 minuti di non-attività (tempo standard impostato per ogni ricetta salvata sulle presse LC55) è più che sufficiente a mantenere il sistema pulito e pronto per la battuta successiva.

Per questo motivo durante il progetto si utilizza lo standard, come di seguito:

$$\Delta t_{pt\ std} = 5\ \text{min} \quad (3.1.9)$$

3.2 CONFORMITÀ DI UN MODELLO IN CERA

Tramite l'applicazione di tutte le informazioni espresse fin ora a proposito del processo di iniezione della cera è teoricamente possibile eseguire correttamente l'operazione.

Ciò nonostante, il rispetto dei vincoli imposti dal sistema pressa e dalle caratteristiche della materia prima non è sempre sufficiente ad ottenere un risultato soddisfacente.

Per questo motivo, è essenziale la definizione del concetto di *conformità di un modello in cera*.

Un modello in cera è ritenuto conforme se e solo se tutti i difetti riscontrati sullo stesso risiedono nel campo di accettabilità riguardo a:

- Indicazioni del cliente (indicazioni di tolleranza, estetica, funzionalità superfici specifiche, etc.)
- Possibili problematiche relative alle fasi del processo successive all'iniezione
- Mantenimento della capacità di processo (se richiesto)

Tale definizione è quanto di più generico si possa affermare a proposito di un prodotto dell'iniezione: è quindi necessario analizzare l'insieme delle caratteristiche che stabiliscono la conformità.

Ogni item si distingue dagli altri per molteplici caratteristiche, che siano esse dimensionali, morfologiche o visive: esse sono alla base della manifestazione di difettosità ben precise sul modello iniettato.

In questa sezione si descrivono le non conformità più importanti che possono essere riscontrate su di un modello in cera, mantenendo un approccio il più generico possibile in modo da poter applicare questi ragionamenti ad ogni item in produzione.

Si descrivono inoltre le caratteristiche misurabili che sono legate all'insorgere di ogni singola difettologia.

Durante il proseguimento del progetto, tali caratteristiche saranno la base della codificazione del singolo item.

Pur non essendo molto utili allo svolgimento di questa trattazione, essi saranno un'importante punto di partenza per le fasi successive del progetto.

La definizione dei vari difetti risulta invece essenziale al proseguimento della trattazione.

Ciò deriva dal fatto che una volta giunti nella fase sperimentale del progetto è necessario lavorare sul singolo item, facendo un passo avanti rispetto alla parte prettamente teorica qui descritta.

L'item analizzato deve essere trattato con una propria definizione di conformità, giudicata in funzione del rispetto di parametri dimensionali e visivi che differiscono da qualsiasi altro prodotto.

E' a questo punto che interviene la definizione di conformità espressa poco fa; non è possibile stabilire la conformità di un particolare se non si conosce la sua storia e le sue caratteristiche.

Ad esempio, se un item viene prodotto per essere un particolare estetico, alcuni difetti che solitamente vengono accettati porterebbero ad uno scarto.

Ugualmente, se una dimensione è sottoposta ad una tolleranza stretta (sia lineare che geometrica), è necessario tenerla in controllo sin dalle fasi iniziali del processo.

A quel punto è quindi necessario ricercare le variabili misurabili che sono in grado di definire completamente la conformità del modello. Elaborando le definizioni teoriche descritte di seguito e le caratteristiche proprie dell'item è possibile isolare tali variabili e utilizzarle come risposte della sperimentazione.

Tornando all'aspetto teorico di questa sezione, per definire la non conformità si esaminano le seguenti difettologie:

- Deformazioni per errato posizionamento
- Deformazioni in fase di estrazione
- Incompletezze
- Avvallamenti
- Rigonfiamenti
- Linee di flusso
- Bolle d'aria
- Giunti freddi
- Anomalie dimensionali lineari

Come detto, la manifestazione di ogni difettologia è funzione di molteplici parametri, classificabili nei seguenti tre gruppi:

- Variabili legate all'iniezione (parametri d'iniezione)
- Variabili legate alla morfologia del modello in cera
- Variabili legate allo stampo

Il primo gruppo è composto dalle variabili modificabili già descritte nella Sezione 3.1.

Gli altri due gruppi sono composti da variabili misurabili ma non modificabili, in quanto sono imposte rispettivamente in fase di sviluppo dell'item e del relativo stampo.

In questa sezione ci si concentra maggiormente su queste due classi di variabili.

Le variabili morfologiche sono direttamente legate alla geometria dell'item: è quindi necessario i parametri che legano le caratteristiche dell'item alla singola difettosità.

Lo stesso discorso vale per le variabili correlate allo stampo, che definiscono il legame tra la morfologia dello stampo e le difettosità riscontrabili.

Entrambe le classi di variabili sono misurabili a partire dal modello matematico tridimensionale, dagli stampi o dai modelli in cera iniettati.

Come si leggerà nei prossimi paragrafi, quando possibile i parametri vengono normalizzati con la superficie esposta totale o il volume totale del modello (rispettivamente A_{tot} e V_{tot}).

3.2.1 Deformazioni per errato posizionamento

Si definisce deformazione per errato posizionamento una variazione della configurazione geometrica di un modello in cera causato da uno sforzo di flessione dopo l'estrazione dallo stampo.

Dopo l'estrazione dei modelli dallo stampo, questi vengono appoggiati su un pianale in attesa che vengano montati sul grappolo.

Se il modello viene appoggiato in modo non adeguato, lo stazionamento unito alla temperatura ancora elevata, che rende il materiale deformabile, genera delle visibili flessioni e/o svergolamenti.

Il periodo minimo di stazionamento varia a seconda della massa del modello. In generale è indispensabile che la cera raffreddi per alcune ore perché raggiunga una temperatura prossima a quella ambiente e quindi ritiri completamente.

Il posizionamento è un passo fondamentale per l'ottenimento della conformità del modello e più in generale della fusione che ne deriva.

Se il difetto in questione non viene individuato subito e corretto, il grezzo di fusione dovrà essere raddrizzato o scartato in fase di controllo visivo.

I modelli soggetti a tali flessioni sono di forma allungata o con parti a sbalzo lunghe e/o sottili; se questi vengono posizionati in modo che possano deformarsi per effetto della gravità, la cera ancora calda può facilitare il verificarsi del problema.

Difetti di questo tipo vengono limitati tramite precise indicazioni di posizionamento.

Il tecnico ha il compito di prevedere quali parti del modello potrebbero andare a deformarsi sotto l'azione della gravità e selezionare la modalità di posizionamento più efficace.

In alcuni casi si ricorre ad appositi attrezzi di posizionamento che diminuiscono gli effetti sopracitati.

Nonostante si cerchi il miglior posizionamento possibile e si ricorra all'utilizzo di queste attrezzature, per alcuni item è comunque possibile che si riscontri tale difetto.

La manifestazione di tale difettosità si lega solitamente alle seguenti ragioni:

- Temperatura elevata della cera al momento dell'estrazione
- Tempo di raffreddamento insufficiente
- Posizionamento non corretto
- Presenza di geometrie a sbalzo lunghe e/o sottili

L'aspetto geometrico su cui è necessario porre l'attenzione è la presenza di volumi a sbalzo in rapporto alla modalità di posizionamento utilizzata. Ipotizzando che il posizionamento utilizzato in produzione sia sempre quello ottimale, è necessario comprendere come individuare le geometrie a sbalzo più pericolose.

Si cerca quindi il volume che subirà il maggiore sforzo flessionale per effetto della forza di gravità.

In generale, lo sforzo flessionale su una trave si può definire come:

$$\sigma_f = \frac{M}{W} \quad (3.2.1)$$

dove M è il momento flessionale imposto e W è il modulo di resistenza a flessione della trave.

Si ipotizza che:

- La zona flessa sia approssimabile ad una mensola a sezione costante rettangolare (mediata opportunamente) caratterizzata dalle dimensioni b e h
- La forza di gravità sia rappresentabile come un carico distribuito costante (p) verso il basso su tutta la lunghezza della mensola

Al netto di tali ipotesi, il problema può essere suddiviso nei due casi elencati di seguito. Per una migliore comprensione si osservi Figura 3.2.1.

- Trave con sezione rettangolare a sbalzo, incastrata in una delle due estremità
- Trave con sezione rettangolare appoggiata sulle due estremità

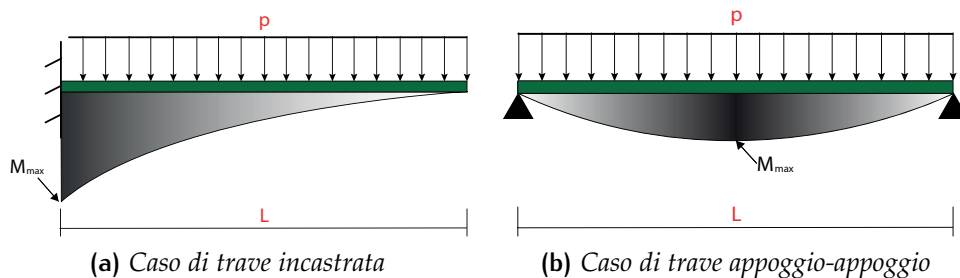


Figura 3.2.1: Schemi esemplificativi dei casi considerati per l'approssimazione della deformazione in posizionamento

Il primo modello matematico rappresenta il caso in cui la trave appoggiata possieda una zona a sbalzo ad una delle sue estremità.

Il secondo rappresenta il caso in cui coesistono due appoggi ma tra di loro c'è un volume sospeso potenzialmente soggetto a flessione.

Poste tali ipotesi si può affermare che:

$$\sigma_{f, \max 1} = \frac{M_{\max 1}}{W} = \frac{p \frac{L^2}{2}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3pL^2}{bh^2} \left(\propto \frac{L^2}{bh^2} \right) \quad (3.2.2)$$

$$\sigma_{f, \max 2} = \frac{M_{\max 2}}{W} = \frac{p \frac{L^2}{8}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3pL^2}{4bh^2} \left(\propto \frac{L^2}{bh^2} \right) \quad (3.2.3)$$

Si definisce quindi il parametro P_m :

$$P_m = \frac{L^2}{bh^2} [mm^{-1}] \quad (3.2.4)$$

E' quindi possibile misurare le zone del modello in cera più soggette a flessione e poi confrontarne gli sforzi massimi utilizzando questa semplificazione.

Una volta inteso il valore più alto, si registra il parametro P_m corrispondente.

I parametri misurabili legati allo stampo non influiscono su questo difetto.

Riassumendo, in questo caso i parametri misurabili da isolare sono i seguenti:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	$P_m [mm^{-1}]$	Parametro indice della massima <i>mensola</i> del modello	Numerico
Stampo	NaN		

3.2.2 Deformazione in fase di estrazione

Si definisce deformazione in fase di estrazione una generica modifica della geometria del modello prodotta dal conflitto tra l'azione estrattiva e le forze resistenti.

E' soprattutto la progettazione dello stampo ad essere causa del manifestarsi di questo difetto.

Se l'estrazione del modello viene progettata correttamente, queste deformazioni sono solitamente ridotte al minimo.

L'insorgere di questa difettosità è quindi fortemente legata alla progettazione dello stampo più che alla geometria dell'item.

La manifestazione della difettologia è legata ai seguenti fattori:

- Temperatura elevata della cera al momento dell'estrazione
- Tempo di raffreddamento insufficiente
- Presenza di superfici che ostacolano il prelievo
- Applicazione non sufficiente di lubrificante
- Prelievo errato
- Disposizione non ottimale degli estrattori
- Assenza terza piastra

A livello morfologico, il fattore più importante tra quelli elencati è la presenza di superfici nello stampo che ostacolano la risalita e il prelievo del modello.

Tali superfici sono dette comunemente *superfici di trattenimento* e sono presenti in ogni stampo, anche se in molti casi non generano problemi di alcun tipo.

Per una maggiore chiarezza è necessario un esempio: se un item possiede un foro ampio il cui asse si sviluppa lungo la direzione di estrazione, lo spazio dello stampo adibito a tale foro presenterà un cilindro pieno di dimensioni simili (*spina*).

Una volta terminato l'afflusso della cera, il materiale si contrae; la cera intorno alla spina è però impossibilitata perché bloccata completamente. Si sviluppano quindi degli sforzi circonferenziali che spingono sensibilmente il materiale contro la superficie dello stampo.

In fase di estrazione, la cera ancora calda e sotto sforzo striscia lungo la spina causando deformazioni nelle zone adiacenti.

La superficie cilindrica dell'esempio viene appunto chiamata superficie di trattenimento dello stampo.

Chiaramente tale fattore è legato alla progettazione dello stampo.

Formalmente, si può definire una superficie di trattenimento come di seguito:

es

Si definiscono:

Variabile	Descrizione
\vec{e}	Versore che definisce la direzione di estrazione
d_e	Piano di estrazione, ortogonale a \vec{e}
X	Corpo analizzato (modello)

Al fine di chiarire le variabili definite, si veda l'immagine esplicativa in Figura 3.2.2. Se il corpo X ammette n volumi vuoti x_v al suo interno, per essere considerato, l' i -esimo volume può essere:

- passante, con direzione principale parallela ad \vec{e}
- cieco (ossia non completamente racchiuso nel corpo X) ma con direzione principale parallela ad \vec{e}

In tali casi, la superficie di trattenimento A_{tri} è definita come la somma delle aree delle superfici appartenenti a x_{vi} e perpendicolari a d_e .

Al fine di parametrizzare tale fenomeno si ricercano tutte le superfici di trattenimento del modello e si sommano ottenendo A_{tr} .

$$A_{tr} = \sum_i^n A_{tri} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.2.5)$$

Si normalizza successivamente il parametro con il valore della superficie esposta totale (A_{tot})

Esistono altri due elementi dello stampo decisivi:

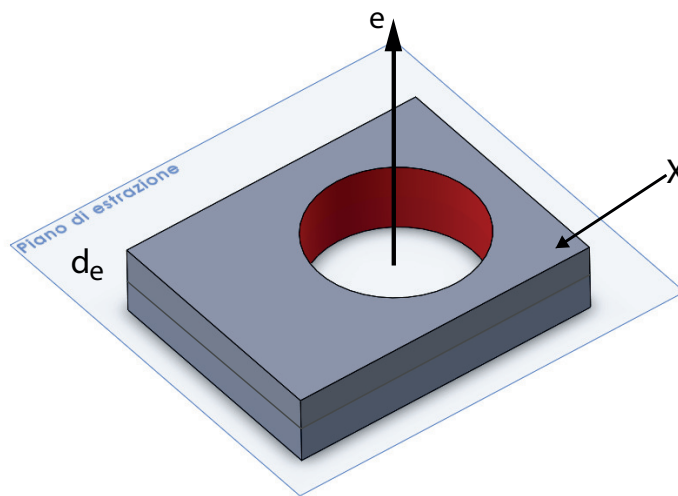


Figura 3.2.2: Immagine esplicativa delle variabili utili alla definizione di A_{tr}

ESTRATTORI Elementi cilindrici allungati con asse parallelo alla direzione di estrazione che, in fase di apertura stampo, distaccano il modello in cera dal semi-stampo inferiore

TERZA PIASTRA Elemento dello stampo che facilita l'uscita del pezzo in caso di sottosquadri o/e difficoltà di estrazione

Gli estrattori sono generalmente presenti in tutti gli stampi e sono essenziali per un'estrazione efficiente.

Per modelli tozzi e di piccole dimensioni è sufficiente un unico estrattore posizionato nella zona centrale mentre nel caso di pezzi grandi o allungati è necessaria un'attenta progettazione del sistema.

Siccome la progettazione del metodo di estrazione è al di fuori di questa trattazione, si suppone che gli estrattori siano sempre posizionati in modo ottimale.

In questo modo non è mai presa in considerazione come variabile la possibilità che una deformazione in fase di estrazione sia provocata da una non corretta posizione degli estrattori nello stampo.

In ogni caso, al fine di quantificare l'azione totale degli estrattori si registra la sezione totale di spinta come di seguito.

Se l'impronta del modello analizzato possiede n estrattori e l' i -esimo possiede una sezione di spinta la cui area è pari a A_{ei} , si definisce A_e la sommatoria delle n sezioni.

$$A_e = \sum_i^n (A_{ei}) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.2.6)$$

E' possibile anche in questo caso una normalizzazione con la superficie totale esposta (A_{tot}).

L'altro fattore decisivo è la presenza della terza piastra nello stampo: in caso di presenza di grandi zone in sottosquadro e di complessità del modello, tale opzione costruttiva di uno stampo è sempre presa in considerazione.

Nel caso di un suo utilizzo, la terza piastra può agevolare di molto l'estrazione del pezzo.

Non soffermandosi sulla morfologia della terza piastra, ci si limita a registrare la presenza o la non presenza. (parametro di tipo ON/OFF).

Si registrano quindi i seguenti parametri:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	NaN		
Stampo	$\frac{A_{tr}}{A_{tot}}$	Superficie totale di trattenimento (normalizzata)	Numerico
	$\frac{A_e}{A_{tot}}$	Sezione di spinta totale estrattori (normalizzata)	Numerico
	PR _{3p}	Presenza terza piastra	ON/OFF

3.2.3 Incompletezze

Si definisce incompletezza una qualsiasi mancanza di materiale dovuta al non totale riempimento dell'impronta.

Se possibile, la manifestazione di incompletezze si contrasta tramite la gestione dei parametri d'iniezione. Successivamente devono essere monitorate tramite controllo visivo del modello in cera.

In generale, la presenza di incompletezze può essere dovuta ai seguenti fattori:

- Temperatura di iniezione bassa
- Temperatura di mantenimento dello stampo bassa
- Pressione di iniezione insufficiente
- Presenza di spessori molto piccoli nel modello
- Presenza di numerose superfici di contatto cera/stampo
- Canale di entrata cera non adeguatamente posizionato

I due parametri geometrici da considerare sono i seguenti:

- Spessore minimo del modello
- Rapporto tra superfici esposte e volume totale del modello

Per quanto riguarda il primo, se la pressione di iniezione è costante, è chiaro che minore è la sezione di passaggio, maggiore è la resistenza al passaggio stesso.

Con uno spessore piccolo del pezzo è perciò più facile che la cera si raffreddi eccessivamente durante il passaggio e che quindi non completi tutti gli spazi vuoti della cavità.

Inoltre la viscosità della cera (stato pastoso) fa sì che in corrispondenza di tali strizioni avvenga un rallentamento del flusso di cera.

Questo ragionamento funziona sia nel caso che ci sia una diminuzione di sezione isolata nel modello sia se lo spessore minimo è vicino all'estremità del pezzo.

La definizione del parametro s_{\min} deve essere precisa e univoca in modo che non ci siano equivoci nel momento in cui si misura la caratteristica sul modello.

Si definisce s_{\min} il diametro della più piccola sfera completamente inscrivibile nel modello, ossia la minima sfera che tocca almeno due pareti esterne rimanendo sempre all'interno del modello stesso.

Per quanto riguarda il rapporto tra superficie esposta e volume, il ragionamento è legato all'entità delle superfici di scambio tra stampo e cera.

Non è però sufficiente considerare solo la somma delle sole superfici esposte; se un particolare è molto massivo, è possibile che abbia una grande superficie esposta senza avere problemi di incompletezze.

Per questo motivo è utile considerare anche il volume per normalizzare il parametro.

I parametri legati allo stampo hanno meno importanza dei morfologici. L'unica variabile che ha peso è la posizione dell'ingresso cera, ossia la sezione di collegamento tra l'impronta da riempire e i canali dello stampo attraverso i quali viene introdotta la cera.

Come per l'iniezione della plastica, la posizione dell'entrata del materiale ha una grandissima importanza per la conformità del pezzo finale.

Ciò nonostante, tale fattore è difficilmente definibile con un numero o con un parametro qualitativo, esattamente come per la posizione degli estrattori descritto nel Paragrafo 3.2.2.

Si ipotizza perciò che il punto di entrata della cera sia sempre nella posizione ottimale, in modo da poter ignorare il parametro.

In ogni caso è utile registrare il parametro relativo alla sezione d'ingresso della cera:

A_{ic_i} è definito come l'area della i -esima sezione d'entrata della cera nell'impronta del modello analizzato.

Se esistono n sezioni d'ingresso, si registra il parametro A_{ic} , così definito:

$$A_{ic} = \sum_i^n (A_{ic_i}) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.2.7)$$

Il parametro può essere normalizzato con il valore della superficie esposta totale del modello (A_{tot}).

Nella seguente tabella si riportano i parametri misurabili da registrare:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	s_{\min} [mm]	Spessore minimo misurato	Numerico
	$\frac{A_{\text{tot}}}{V_{\text{tot}}}$ [mm ⁻¹]	Rapporto tra superficie esposta e volume totale del modello	Numerico
Stampo	$\frac{A_{\text{ic}}}{A_{\text{tot}}}$	Area sezione ingresso cera (normalizzata)	Numerico

3.2.4 Avvallamenti

Si definisce avvallamento una concavità di una superficie del particolare; il difetto rende non conforme la planarità di quella superficie e di fatto diminuisce il volume totale del modello.

Gli avvallamenti sono provocati dal fenomeno del ritiro volumetrico dei materiali durante il raffreddamento. Anche nel caso della cera, man mano che la temperatura si abbassa, si verifica una contrazione.

Se una porzione del modello ammette una superficie esterna ampia e sotto di essa e è presente una grande quantità di materiale, il fenomeno provoca una convergenza del materiale verso l'interno.

Tale fenomeno è conosciuto anche in fonderia, in cui è usuale osservare il cosiddetto *cono di ritiro*, derivato dallo stesso fenomeno ma applicato alle leghe metalliche.

Anche per questo motivo, in fonderia è molto difficile ottenere una superficie ampia planare.

L'operazione è ancor più critica per una fonderia a cera persa poiché si passa da due fenomeni di ritiro in serie invece che da uno solo.

Proprio per tale ragione, nel campo dell'Investment casting è usuale ripetere la massima «è molto più semplice ottenere una sfera che un cubo».

Indicativamente, l'insorgere di avvallamenti è collegato ai seguenti fattori:

- Temperatura di iniezione elevata
- Pressione di iniezione bassa
- Presenza di ampie superfici planari
- Modello massivo

- Rapporto basso tra superficie esposta e volume del modello
- Errato dimensionamento della sezione d'ingresso della cera
- Assenza di raffreddanti

La presenza di avvallamenti è molto influenzata dalla geometria del modello in quanto è legata principalmente alla formazione di punti caldi all'interno delle zone massive vicine alle superfici esterne ampie.

Si prendono in considerazione i seguenti parametri morfologici:

- Volume totale del modello
- Rapporto tra superfici esposte e volume totale
- Superficie planare più ampia

I primi due parametri sono stati già descritti e definiti.

Questi non bastano però a descrivere il fenomeno: se ad esempio un modello è caratterizzato da un volume elevato e un rapporto $\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$ basso, è comunque possibile che esso non possieda una superficie esposta grande abbastanza da generare avvallamenti.

Il terzo parametro elencato si occupa di definire proprio questo aspetto del problema:

Si definisce $A_{p\ max}$ l'area della massima superficie esposta planare presente sul modello in cera.

In questo caso è possibile effettuare una normalizzazione con il parametro A_{tot} .

Si possono individuare due elementi legati allo stampo che potrebbero influenzare la presenza di questa difettologia:

- Sezione dell'ingresso cera
- Presenza dei raffreddanti

Si è già descritta la funzione dell'ingresso cera; anche in questo caso è possibile registrare solo il parametro inerente al valore della sezione d'ingresso A_{ic} .

L'iniezione con *raffreddanti* è consigliata proprio per evitare gli avvallamenti. Anche in questo caso, è utile ricorrere ad un esempio per esporre questa particolare metodologia.

Si vuole ottenere un modello in cera X, caratterizzato da un basso rapporto A_{tot}/V_{tot} e da un alto valore di V_{tot} .

Tale impronta sarà fortemente soggetta ad avvallamenti sulle superfici esposte in prossimità dei volumi maggiori.

In questo caso si ricorre spesso alla progettazione di uno stampo dotato di raffreddanti, ossia di impronte aggiuntive da iniettare prima di X.

Tali impronte (X_{raff}) sono realizzate in modo che ricalchino una buona parte del volume totale di X.

Una volta iniettato X_{raff} e fatto solidificare, viene inserito nello stampo nell'impronta di X. Così facendo, al momento dell'iniezione gran parte del volume dell'impronta è già occupato da materiale solido, limitando di molto il ritiro della cera e di conseguenza la manifestazione di avvallamenti.

L'utilizzo di un sistema con raffreddanti è spesso preso in considerazione per l'iniezione di pezzi massivi ma con necessità di buoni valori di planarità.

In casi estremi si può anche procedere per passaggi, progettando raffreddanti a matrioska in modo da limitare al massimo la presenza di difetti.

Naturalmente, tale pratica è particolarmente costosa a causa della maggiore complessità dello stampo.

Anche in questo caso, la variabile legata alla presenza dei raffreddanti è di tipo ON/OFF.

Si registrano perciò i seguenti parametri:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	V_{tot}	Volume totale del modello	Numerico
	$\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	Rapporto tra superficie esposta e volume totale del modello	Numerico
	$\frac{A_{p\ max}}{A_{tot}}$	Area della superficie esposta più ampia (normalizzata)	Numerico
Stampo	$\frac{A_{ic}}{A_{tot}}$	Area sezione ingresso cera (normalizzata)	Numerico
	PR_{raff}	Presenza raffreddanti	ON/OFF

3.2.5 Rigonfiamenti

Si definisce rigonfiamento una convessità superficiale del modello. Si tratta del difetto morfologicamente duale all'avvallamento.

Le cause scatenanti sono differenti da quelle che portano ad un avvallamento. Possono manifestarsi due tipi di rigonfiamento:

- Rigonfiamento per bolle d'aria
- Rigonfiamento per vuoto

Nel primo caso, il difetto viene normalmente generato dall'errata gestione della portata di cera entrante e dai tempi di raffreddamento.

L'utilizzo di un valore di portata troppo elevato può generare delle turbolenze nel materiale entrante. Il fenomeno porta alla creazione di sacche d'aria all'interno del corpo in raffreddamento.

Il gas all'interno della sacca si trova necessariamente alla pressione della cera all'interno dello stampo, funzione del parametro d'iniezione P (pressione di impaccamento).

Se la temperatura della cera a fine raffreddamento è troppo elevata, al momento dell'estrazione è possibile che la pressione del gas sia maggiore della resistenza della cera intorno alla sacca.

In questo caso le superfici intorno alla sacca vengono deformate verso l'esterno; al fine di chiarire il concetto si osservi Figura 3.2.3.

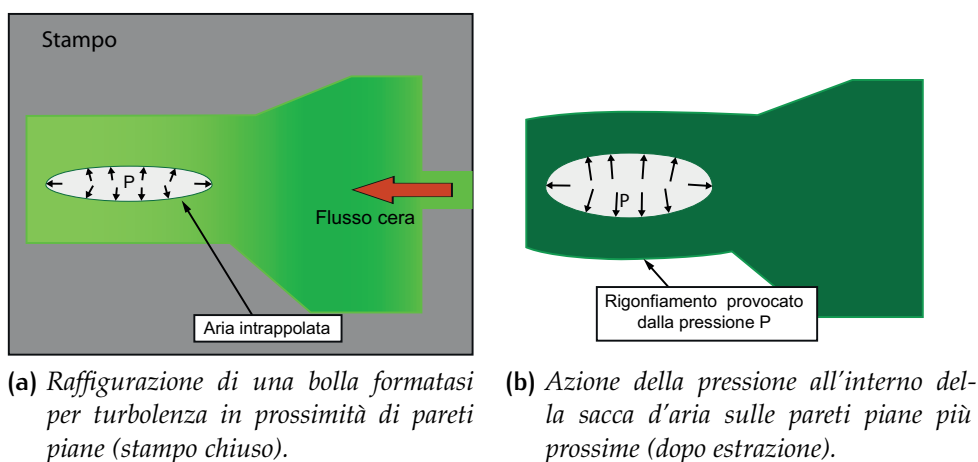


Figura 3.2.3: Rigonfiamento per bolla d'aria.

Al contrario, i rigonfiamenti per vuoto si devono soprattutto a particolari geometrie del modello e dello stampo.

Si pone il caso in cui un modello possieda un foro cieco molto ampio e/o profondo con asse principale parallelo alla direzione di estrazione.

In questo caso, soprattutto per portate entranti basse, è molto probabile che la cera riempia completamente il volume, rendendo impossibile il passaggio dell'aria.

In fase di apertura dei semi-stampi o durante l'estrazione, in prossimità del volume descritto il modello si comporta come una ventosa. Essendo la cera ancora calda e deformabile, il forzamento dell'estrazione causa un rigonfiamento della superficie all'apice del foro cieco.

Per ovviare al problema si scavano solitamente degli sfiati per l'aria nelle zone cieche. Questi aiutano l'afflusso dell'aria in fase di iniezione e di estrazione.

Anche se i due tipi di rigonfiamenti sono causati da variabili diverse, l'effetto visivo sul modello è identico. Si è deciso quindi di unirle in un unico gruppo in modo da semplificare le successive analisi.

I rigonfiamenti possono essere provocati da:

- Temperatura di iniezione elevata
- Portata entrante elevata
- Pressione di impaccamento elevata
- Tempi di raffreddamento contenuti
- Rapporto basso tra superficie esposta e volume del modello
- Presenza di volumi ciechi
- Assenza di sfiati nello stampo

I parametri geometrici giocano un ruolo importante per entrambe le tipologie di rigonfiamento.

Nel caso dei rigonfiamenti provocati da bolle d'aria è importante registrare il rapporto tra superfici esposte e volume del modello.

Tale parametro potrebbe essere importante per il fatto che i punti caldi (tipici dei particolari massivi) sono più soggetti alla formazioni di sacche d'aria.

In riferimento ai rigonfiamenti per vuoto, è necessario registrare un parametro che caratterizzi l'eventuale presenza di un foro cieco parallelo alla direzione di estrazione.

Per descrivere questa caratteristica si cerca il massimo tra i fori con le caratteristiche descritte e se ne misura il volume.

Formalmente:

Come definito per le deformazioni in estrazione:

Variabile	Descrizione
\vec{e}	Versore che definisce la direzione di estrazione
d_1	Piano di estrazione, ortogonale a \vec{e}
X	Corpo analizzato

Se il corpo X ammette n volumi vuoti χ_{fc} al suo interno, per essere considerato, l' i -esimo volume deve presentare le seguenti caratteristiche:

- direzione principale parallela ad \vec{e}
- chiusura di una delle due estremità della cavità

Per ogni i -esimo volume $\chi_{fc i}$ si può definirne il volume $V_{fc i}$ chiudendo l'estremità aperta tramite un piano a livello della superficie di uscita.

Si cerca quindi tra gli n volumi ciechi quello con volume massimo.

$$V_{fc \max} = \max(V_{fc 1} V_{fc 2} \dots V_{fc n}) \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.2.8)$$

Essendo un parametro di volume, è possibile normalizzare $V_{fc \max}$ con V_{tot} .

Si registra la variabile descritta nella classe dei parametri legati allo stampo poiché è influenzata dalla progettazione dello stesso (direzione di estrazione).

Un'ulteriore variabile legata allo stampo che influisce è la presenza degli sfiati per l'aria in prossimità delle cavità più profonde.

In alcuni casi, tramite il posizionamento di sfiati in punti strategici dello stampo è possibile eliminare completamente i rigonfiamenti per vuoto.

La presenza o meno di tali sfiati è riassunto da un parametro di tipo ON/OFF.

I parametri inerenti a tali difettosità sono i seguenti:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	$\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$ [mm ⁻¹]	Rapporto tra superficie esposta e volume del modello	Numerico
Stampo	$\frac{V_{fc,max}}{V_{tot}}$	Volume del massimo foro cieco (normalizzato)	Numerico
	PR _{sf}	Presenza sfiati	ON/OFF

3.2.6 Linee di flusso

Si definiscono linee di flusso quei difetti lineari che si manifestano superficialmente sotto forma di onde solidificate.

E' frequente ritrovare queste difettosità su modelli particolarmente massivi oppure quando la temperatura della cera è troppo bassa.

Fisicamente, la bassa temperatura di cera e stampo avvicina lo stato della cera alla solidificazione. Durante l'accumulo nelle zone più prossime alle pareti, la cera tende così a sovrapporsi a se stessa.

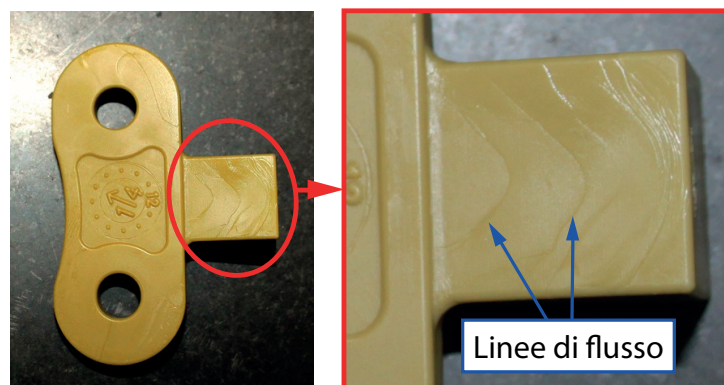


Figura 3.2.4: Esempi di manifestazione di linee di flusso su particolari in produzione

L'effetto che si ottiene, se visibile sulla superficie del modello, è appunto una serie di onde che ricalcano il flusso del materiale in entrata. Si osservi Figura 3.2.4 come immagine esemplificativa.

Nei casi più evidenti, la soluzione più utilizzata è la creazione di sfiati nello stampo in prossimità delle zone più massive per eliminare eventuali rallentamenti della cera.

A meno di richieste specifiche del cliente o di eventuale intaccamento di superfici estetiche, la presenza di tali difetti è solitamente concessa.

Ciò è dovuto al fatto che se il difetto non è eccessivamente marcato, i successivi passaggi del processo cancellano ogni traccia.

Teoricamente, l'insorgere di linee di flusso è legata a:

- Temperatura di iniezione bassa
- Portata entrante bassa
- Volume totale del modello elevato
- Rapporto basso tra superficie esposta e volume del modello
- Assenza di sfiati nello stampo

I parametri geometrici che possono essere legati al difetto sono stati definiti in precedenza.

Anche in questo caso, l'unico parametro decisivo per quanto riguarda lo stampo è la presenza degli sfiati nelle zone critiche.

Si registrano i seguenti parametri:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	V_{tot} [mm ³]	Volume del modello	Numerico
	$\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$ [mm ⁻¹]	Rapporto tra superficie esposta e volume del modello	Numerico
Stampo	PR _{sf}	Presenza sfiati	ON/OFF

3.2.7 Bolle d'aria

Una bolla d'aria è difetto superficiale che deriva dall'impossibilità di uscire dei gas dallo stampo. Tale fenomeno si manifesta solitamente in forma di macchie, rigonfiamenti puntuali o crateri.

Esiste una forte correlazione tra questa difettologia e il rigonfiamento per bolle d'aria descritto nel Paragrafo 3.2.5.

Il difetto qui descritto si riferisce alla presenza di sacche d'aria in prossimità della superficie, formatesi per l'impossibilità di uscire da eventuali vicoli ciechi della cavità.

Nel caso dei rigonfiamenti, l'intrappolamento è dovuto alla turbolenza.

La manifestazione di bolle può essere controllata tramite l'introduzione di sfiati per l'aria nello stampo: in questo caso la preparazione di un tecnico sta nel prevedere quali siano i punti critici da monitorare.

Tali zone sono chiamate *volumi ciechi*: in queste cavità l'aria non ha la possibilità di sfogare e dà luogo al difetto.

Al contrario dei rigonfiamenti questa difettosità è favorita da portate entranti alte: in questa condizione l'aria nel volume cieco non ha il tempo di uscire dalla cavità prima che la cera termini il riempimento.

In generale, il difetto è facilitato dai seguenti fattori:

- Temperatura d'iniezione elevata
- Portata entrante elevata
- Presenza di volumi ciechi
- Assenza sfiati

La presenza di bolle è chiaramente legata alla progettazione dello stampo; è fondamentale caratterizzare il concetto di *volume cieco*.

Formalmente:

Il generico volume cieco può essere schematizzato come in Figura 3.2.5, ossia come un condotto chiuso ad una delle estremità, in cui è forzato il flusso di cera.

Il valore del singolo volume cieco può essere calcolato solo tramite l'identificazione di uno spazio chiuso.

Se il corpo ammette n_{vc} volumi ciechi x_{vc} al suo interno, il valore del volume dell' i -esimo $x_{vc i}$ è definito come $V_{vc i}$.

Essendo un condotto a vicolo cieco, è necessaria una superficie immaginaria per creare uno spazio tridimensionale chiuso.

Tale superficie (B) può essere registrata come evidenziato in Figura 3.2.5 e deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Deve essere una superficie piana
- Deve chiudere il volume cieco
- Deve essere parallela alla direzione del flusso cera
- Tra la superficie A e la superficie B sullo stampo non devono essere presenti sfiati
- Al netto delle ipotesi precedenti, B deve essere il più lontano possibile dalla superficie A

Una volta identificato lo spazio e calcolatone il valore di volume ($V_{vc i}$) si riporta la sommatoria sugli n_{vc} spazi considerati:

$$V_{vc \text{ tot}} = \sum_i^{n_{vc}} (V_{vc i}) \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.2.9)$$

Si definisce il parametro V_{vc} come sopra; oltre ad esso si registrano anche la misura inerente al numero di volumi ciechi presenti (n_{vc}).

Conviene definire il parametro V_{vc} normalizzandolo con il valore del volume totale del modello.

Siccome i difetti sono facilitati da volumi ciechi voluminosi e con una sezione di passaggio piccola, è utile registrare anche il massimo rapporto tra questi due parametri.

A tal proposito, si definisce anche il parametro:

$$r_{vc \text{ max}} = \max\left(\frac{V_{vc 1}}{A_{B 1}} \frac{V_{vc 2}}{A_{B 2}} \dots \frac{V_{vc n_{vc}}}{A_{B n_{vc}}}\right) \text{ [mm]} \quad (3.2.10)$$

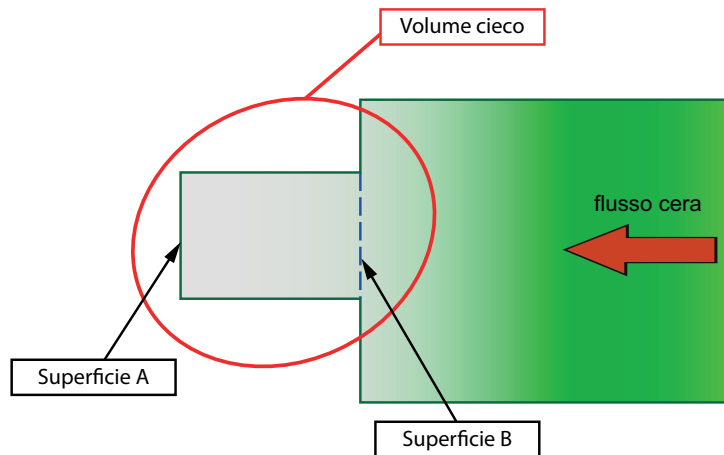


Figura 3.2.5: Rappresentazione della sezione del generico volume cieco

Un altro parametro importante inerente allo stampo è la presenza degli sfiati nelle cavità critiche. Come già descritto, gli sfiati evitano l'insorgere di problemi legati alla presenza di aria nelle cavità.

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	NaN		
Stampo	$\frac{V_{vc}}{V_{tot}}$	Massimo volume cieco (normalizzato)	Numerico
	n_{vc}	Numero dei volumi ciechi presenti nel modello	Numerico
	$r_{vc\ max}$ [mm]	Massimo rapporto tra volume cieco e relativa superficie di chiusura	Numerico
	PR_{sf}	Presenza sfiati	ON/OFF

3.2.8 Giunti freddi

Si definisce giunto freddo quel difetto che deriva dall'incontro senza unione di due fronti di cera in afflusso.

A livello geometrico l'insorgere di questo difetto è subordinato alla presenza di superfici che separino il flusso in più rami per poi ricongiungerli. Un esempio comune è rappresentato da un foro passante il cui asse è perpendicolare al flusso di cera come nel caso rappresentato in Figura 3.2.6.

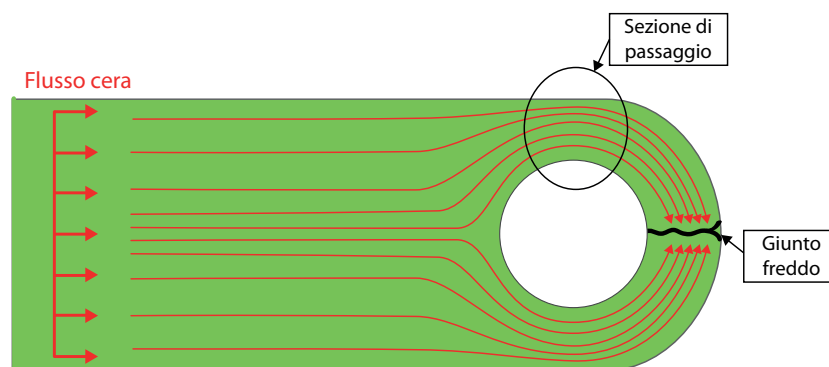


Figura 3.2.6: Rappresentazione della formazione di un giunto freddo

Il difetto è inoltre legato alla temperatura della cera. Il giunto freddo diviene visibile solo se al momento della ricomposizione del flusso la temperatura della cera è sufficientemente bassa perché i due fronti non si uniscano completamente.

Ovviamente un fenomeno di questo genere è fortemente legato anche alla portata entrante: un flusso contenuto favorisce il raffreddamento della cera in movimento.

Anche in questo caso la difettosità è spesso contrastata con l'introduzione di sfiati in punti strategici dello stampo.

La difettosità descritta è favorita dai seguenti fattori:

- Temperatura d'iniezione bassa
- Portata entrante contenuta
- Presenza di piccole sezioni di passaggio
- Assenza di sfiati

Per quanto riguarda gli aspetti morfologici del modello si considerano i seguenti parametri misurabili:

- Spessore minimo
- Sezione di passaggio del flusso diviso

Il parametro che descrive lo spessore minimo (s_{\min}) è stato già definito. La variabile indice della sezione di passaggio si può così definire:

Se il corpo analizzato X ammette n volumi vuoti x_v al suo interno, per essere considerato, è necessario che l' i -esimo volume debba:

- Dividere il flusso di cera entrante
- Essere racchiuso dal flusso della cera, ossia tale flusso deve poter ricongiungersi una volta superato il volume considerato

Se tali ipotesi sono rispettate, si possono definire:

Variabile	Descrizione
\vec{f}_i	Vettore indicante la direzione del flusso di materiale in prossimità di x_{v_i}
$A_{v \max i}$	Area della sezione massima di x_{v_i} dividente il flusso. Tale sezione deve essere avvolta dal flusso.
$A_{p i}$	Area della sezione di passaggio del flusso in corrispondenza di $A_{v \max i}$.

Un'esemplificazione grafica delle variabili definite è riportata in Figura 3.2.7. Per ogni x_{v_i} si definisce il rapporto:

$$r_{A_{p i}} = \frac{A_{v \max i}}{A_{p i}} \quad (3.2.11)$$

Tra gli n volumi vuoti è interessante evidenziare quello caratterizzato dal più alto valore di $r_{A_{p i}}$. Si registra quindi il parametro $r_{A_{p \max}}$, così definito:

$$r_{A_{p \max}} = \max(r_{A_{p 1}} \ r_{A_{p 2}} \ \dots \ r_{A_{p n}}) \quad (3.2.12)$$

Per quanto riguarda i parametri legati allo stampo, si registra la presenza di sfiati tramite una variabile di tipo ON/OFF.

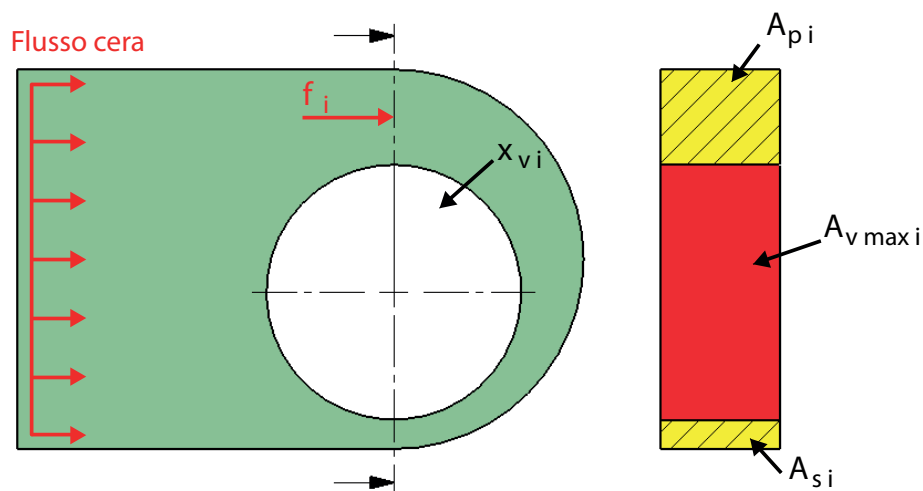


Figura 3.2.7: Esempificazione delle variabili inerenti alla sezione di passaggio del flusso diviso

Si registrano quindi i seguenti parametri:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	s_{min} [mm]	Spessore minimo misurato	Numerico
	r_{Apmax}	Rapporto indice della sezione di passaggio del flusso diviso (normalizzato)	Numerico
Stampo	PR_{sf}	Presenza sfiati	ON/OFF

3.2.9 Anomalie dimensionali lineari

Si ha un'anomalia dimensionale lineare nel caso in cui le singole dimensioni lineari del modello in cera non rispettano le relative specifiche di tolleranza.

La valutazione di tali anomalie a livello di modello in cera è utile per minimizzare le non conformità dimensionali a processo finito. Queste sono legate soprattutto a errori commessi a monte della fase di iniezione.

L'anomalia è solitamente funzione di un errato calcolo del ritiro lineare da assegnare in fase di industrializzazione dello stampo.

A meno di casi eccezionali, la rilevazione di un'anomalia dimensionale sulla cera porta alla modifica dello stampo.

E' infatti molto complesso regolare le dimensioni del generico modello tramite il controllo dei parametri d'iniezione.

Detto ciò, è comunque opportuno individuare un set di parametri d'iniezione che favoriscano la stabilità dimensionale di un modello.

Le modalità di determinazione del ritiro lineare per il processo di Investment casting non sono oggetto di questa trattazione.

E' comunque necessario descrivere alcune peculiarità inerenti a tali metodi per definire le basi su cui poggiano alcune analisi svolte in fase sperimentale.

A livello di grezzo di fusione, la conformità è identificata da un campo di tolleranza assegnato dal cliente sul disegno.

Per le quote senza indicazione di tolleranza si applicano le tolleranze generali in funzione del valore della dimensione lineare.

Il cliente accetta normalmente i gradi di tolleranza presenti nel catalogo Microcast.

Le tolleranze generali sono divise in tre gradi: il *grado D1* ammette campi più ampi, il *grado D2* è il grado standard mentre il *grado D3* è il più restrittivo ed è applicabile al prodotto solo dopo eventuali correzioni dello stampo.

Tabella 3.2.1: I range di tolleranza utilizzati in Microcast in funzione della dimensione lineare x_{dim}

Variabile	Descrizione	Funzione lineare associata
I_{D1}	Intervallo per grado D1	$I(x_{dim}) = 0,248 + 1,045 \cdot 10^{-2} \cdot x_{dim}$
I_{D2}	Intervallo per grado D2	$I(x_{dim}) = 0,155 + 0,836 \cdot 10^{-2} \cdot x_{dim}$
I_{D3}	Intervallo per grado D3	$I(x_{dim}) = 0,193 + 0,344 \cdot 10^{-2} \cdot x_{dim}$

I tre campi di tolleranza si possono considerare come in Figura 3.2.8, dove se ne mostrano gli andamenti qualitativi al variare della dimensione.

In Tabella 3.2.1 sono definiti i simboli per i tre range di tolleranza. x_{dim} definisce la dimensione generica associata al singolo intervallo.

I_{D2} è il campo di riferimento per qualsiasi prodotto Microcast a livello di grezzo di fusione; il campo riferito ai modelli in cera è più stretto.

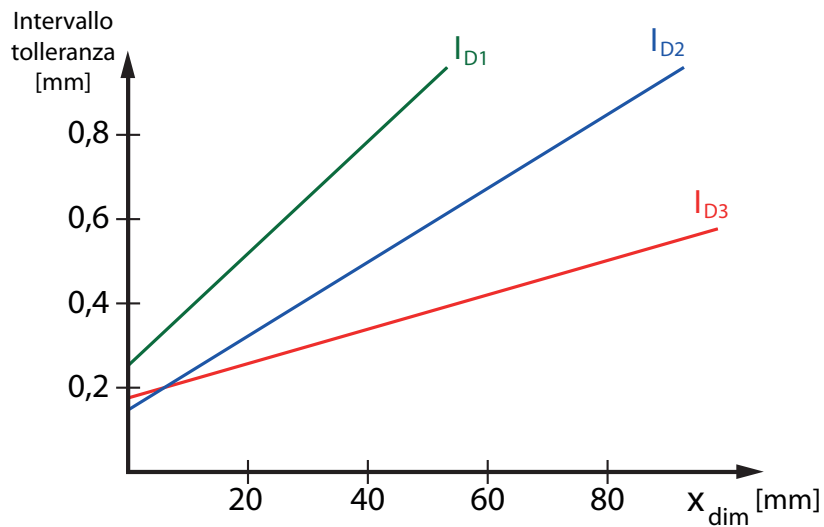


Figura 3.2.8: Andamento qualitativo semplificato dell'ampiezza dei range di tolleranza per dim. lineari al variare del valore della dimensione del grezzo di fusione

In fase di progettazione dello stampo è necessario stimare il ritiro lineare da applicare al disegno.

La differenza tra ritiro assegnato in fase di progettazione e ritiro misurato si trasforma in uno slittamento del valore medio di una dimensione (*shift*). Lo *shift* è a tutti gli effetti un errore sistematico e può essere corretto tramite apposite modifiche dello stampo.

In passato sono stati eseguiti studi inerenti alla variabilità delle quote lineari in modo da non considerare gli errori sistematici.

Si è stimato che la variabilità naturale del processo Microcast ($6\sigma_{tot}$) relativa ad una generica dimensione lineare è paragonabile a I_{D3} .

Si può quindi sostenere che la differenza di variabilità tra I_{D2} (variabilità standard) e I_{D3} sia la massimo *shift* concesso perché vi sia conformità dimensionale.

In sintesi:

$$I_{D2} = \text{Shift}_{\max} + I_{D3} \quad (3.2.13)$$

$$I_{D3} \simeq 6\sigma_{\text{proc}} \quad (3.2.14)$$

Eliminando il fattore *shift*, una generica dimensione lineare si distribuisce quindi come raffigurato in 3.2.9.

Il disegno individua il range di tolleranza da rispettare per i grezzi di fusione: durante tutta questa trattazione si parla invece di iniezione della cera. Ciò significa che anche I_{D3} è un campo troppo ampio da considerare.

I_{D3} considera la somma tra due variabilità differenti, rispettivamente quella relativa al ritiro dato dalla solidificazione della cera e quella data dalla solidificazione dell'acciaio.

Ognuno dei fenomeni presenta una propria variabilità dimensionale. Solitamente tali variabilità si considerano di entità simile.

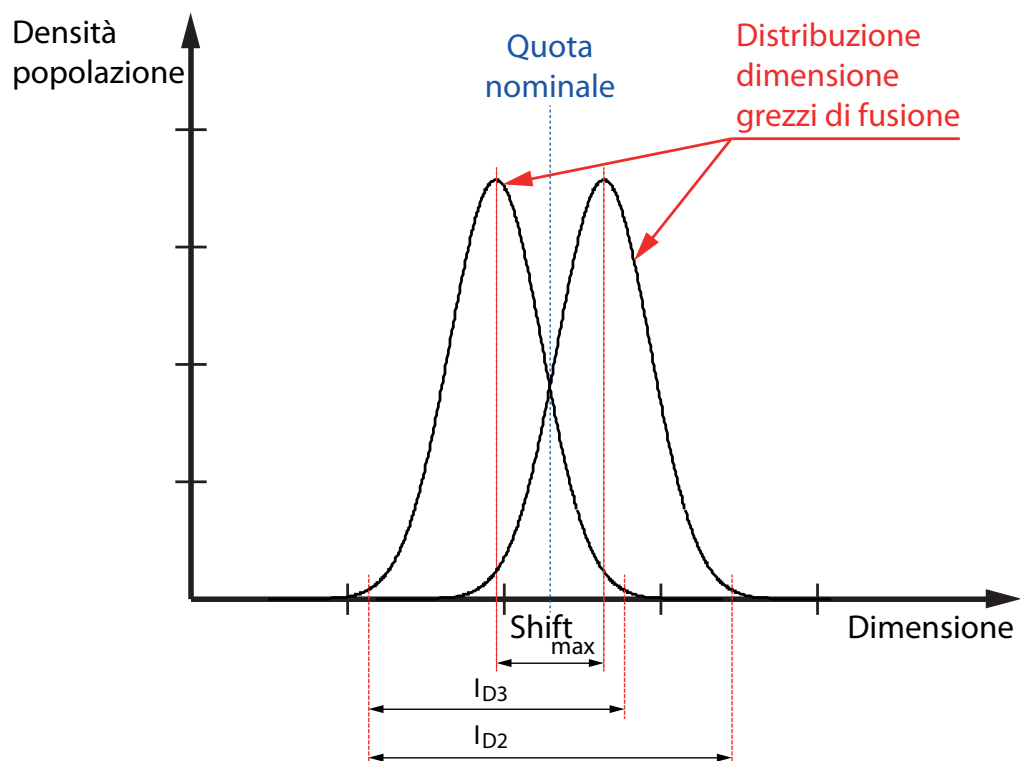


Figura 3.2.9: L'azione dello Shift sulla variabilità del processo

A tal proposito si introduce un coefficiente di sicurezza che limita l'intervallo di tolleranza imposto sui modelli in cera (I_{cera}).

Questo è definito come di seguito:

$$I_{cera} = \frac{I_{D3}}{2} \quad (3.2.15)$$

A fronte della volontà di stimare la conformità della dimensione di un modello durante il proseguo della trattazione, verranno seguite le nozioni sopra riportate.

Tornando alla definizione dei parametri misurabili, a livello geometrico, è necessario tenere in considerazione i seguenti fattori:

- Superficie totale di trattenimento
- Volume totale del modello
- Dimensione lineare massima del modello

La presenza di superfici di trattenimento (già definito nel Paragrafo 3.2.2) differenzia il ritiro della cera nello stampo, rendendone molto più complicata la previsione.

Può essere utile registrare anche la lunghezza massima del pezzo, così definibile:

Si definisce l_{max} come la distanza tra i due punti più distanti tra loro, misurati sul modello in cera. Si esclude dalla casistica l'attacco di colata poiché non ammette tolleranze dimensionali.

In corrispondenza di l_{max} si ha la massima variabilità dimensionale del modello; tale misura può quindi essere utile sia come parametro che come variabile di risposta poiché a parità di risoluzione degli strumenti si ha una maggiore variabilità.

Registrando tale parametro si ha anche un'idea dell'ingombro del particolare.

Per la stessa ragione si registra anche il volume totale del modello (V_{tot}).

Per quanto riguarda le caratteristiche dello stampo può rivelarsi importante l'utilizzo di raffreddanti.

Come per la riduzione degli avvallamenti, la presenza dei raffreddanti ha un'importanza cruciale nel mantenere la conformità geometrica nei particolari più massivi.

Grazie a questa tecnica costruttiva è anche possibile stabilizzare le dimensioni più complesse da ottenere in caso di modelli di grandi dimensioni.

E' quindi necessario registrare i seguenti parametri:

Tipo Variabili	Parametro	Descrizione	Tipologia
Geometriche	V_{tot} [m.m ³]	Volume totale del modello	Numerico
	l_{max} [mm]	Lunghezza massima del modello	Numerico
Stampo	$\frac{A_{\text{tr}}}{A_{\text{tot}}}$	Superficie totale di trattenimento (normalizzata)	Numerico
	PR_{raff}	Presenza raffreddanti	ON/OFF

4 | PROPEDEUTICA ALLA SPERIMENTAZIONE

In questo capitolo vengono descritti alcuni dei passaggi preparativi che determinano come verrà eseguita la sperimentazione.

In una prima sezione viene descritto l'algoritmo con cui sono stati ordinati i prodotti Microcast al fine di selezionare i primi item su cui intervenire e con cui creare una base di banca dati per il progetto.

Tale algoritmo è stato sviluppato interagendo tra più enti interni all'azienda, in modo tale da creare un ordinamento basato non solo su informazioni tecniche. Così facendo si è cercato di tenere in considerazione anche le variabili riguardanti la produzione e la logistica, ampliando la visione d'insieme del progetto.

Nella seconda sezione del capitolo si descrive l'esperimento di preparazione allo screening dei fattori. Tale esperimento è un vero e proprio indice della Capacità di Processo (CP) di iniezione della cera.

Grazie a questa sperimentazione preventiva si cerca di ottenere alcune informazioni mirate da sfruttare durante l'esperimento principale della trattazione e nei seguenti passi del progetto aziendale.

L'obiettivo principale della seconda sezione è ricavare il numero di repliche da effettuare durante l'esperimento principale al fine di mantenere una potenza sufficiente.

4.1 ORDINAMENTO E SELEZIONE DEL CAMPIO- NE DI SPERIMENTAZIONE

Un passo essenziale per costruire un piano sperimentale è la selezione del campione da studiare.

Come detto precedentemente, durante questa trattazione viene studiato un unico stampo rappresentativo della produzione, ma un ordinamento ragionato dei prodotti Microcast sarà utile agli studi successivi del progetto aziendale.

E' necessario mettere in chiaro che gli item selezionabili per la sperimentazione sono nell'ordine delle migliaia: con i tempi e le risorse a disposizione la scelta deve essere quindi direzionata verso prodotti che rappresentano al meglio l'azienda dal punto di vista produttivo.

In verità, la strada da seguire per un ordinamento ottimale coincide con una classificazione totale dei prodotti Microcast.

Analizzando le possibilità che offrono le tecniche di classificazione *Group Technology* (si consulti il riferimento [6]) si comprende immediatamente che un codice alfanumerico misto potrebbe essere la soluzione corretta per classificare i diversi item.

Senza entrare in dettagli, tale codice potrebbe essere formato da parametri di tipo produttivo (tempi di iniezione, volume ordini, costi, etc.), morfologico/geometrico (dimensioni, ingombri, etc.) e parametri inerenti allo stampo di appartenenza dell'item (materiale stampo, # impronte, # item diversi nello stampo, etc.).

Questa idea è proprio quella che si vuole sviluppare nel tempo: in base a una serie di parametri modificabili e/o misurabili (descritti nella Capitolo 3), può essere costruita una rete di informazioni in continuo aggiornamento che restituisce i parametri di iniezione ottimali in funzione dei parametri misurabili del singolo item.

Al di là dell'ottimizzazione dei parametri d'iniezione, costruire un sistema di questo genere nel breve periodo per fini di ordinamento è assolutamente impraticabile per varie ragioni.

Basti sapere che esistono circa 2000 item prodotti in Italia da Microcast: ciò significa che solo per raccogliere la quantità di informazioni necessarie per questo compito sarebbe necessario impegnare più persone per parecchi mesi.

In questa fase della trattazione, una classificazione così descritta avrebbe l'obiettivo di dividere i prodotti in più classi ordinabili secondo i diversi parametri.

Inoltre, una classificazione di questo tipo non comprenderebbe i parametri di iniezione ottimizzati, limitandosi solo a fare da banca dati delle caratteristiche morfologiche.

Si sarebbe potuto poi ragionare in diverse direzioni per una selezione più mirata di quella che invece si è realmente effettuata .

Per queste ragioni si è optato per una soluzione meno efficace ma più semplice da costruire. Si tratta di una soluzione molto meno onerosa in

termini di tempo ma è anche vero che il risultato di questa operazione non è in grado di ordinare definitivamente gli item.

Essa si limita ad indirizzare la selezione e facilita i primi passi della sperimentazione.

L'algoritmo di ordinamento sfrutta come variabile il *tempo di utilizzo in battuta*, ossia un'opportuna elaborazione del tempo che viene dedicato annualmente all'iniezione di un singolo codice.

Questo viene ricavato da opportuni calcoli effettuati a partire da dati inerenti alla produzione Microcast, scaricati direttamente dal programma gestionale aziendale.

E' necessario specificare che i dati di produzione raccolti partono dal gennaio 2008 e arrivano fino al dicembre 2013 e quindi tutta la procedura è limitata da questo intervallo temporale.

L'algoritmo è stato elaborato utilizzando il software Microsoft EXCEL©. Ogni riga della tabella rappresenta una riga d'ordine di un prodotto. Tale riga è caratterizzata dalle seguenti informazioni:

Variabile	Descrizione
Codice articolo	Codice storico Microcast relativo al singolo prodotto
Quantità riga ordine	Volume del lotto di produzione
# Impronte	Numero di impronte di un prodotto nel suo stampo di appartenenza
Data assunzione ordine	Data in cui l'ordine è stato inserito nel programma gestionale

Naturalmente, ogni item può ammettere più di una riga d'ordine: ciò significa che questi è stato ordinato più volte nel periodo di osservazione.

Oltre che trasformazioni di variabile e raggruppamenti per caratteristica, vengono anche predisposte delle pesature temporali sui dati. Così facendo si cerca di ottenere un metodo che prende in considerazione anche variabili prettamente produttive.

Tale operazione è necessaria affinché un prodotto iniettato spesso di recente venga evidenziato dall'ordinamento a discapito di uno che invece è stato spesso prodotto in passato.

Si vuole così favorire gli articoli più prodotti di recente, che probabilmente verranno ordinati spesso nel prossimo futuro.

Al fine di avere una traccia marcata di questa operazione si è optato per una pesatura esponenziale; si discuteranno i termini di questo ragionamento nel prossimo paragrafo.

E' inoltre necessario operare una scelta obbligata, ossia decidere di ordinare i singoli item o direttamente gli stampi di appartenenza.

La logica porterebbe a scegliere la prima ipotesi visto che in alcuni casi lo stampo è occupato da impronte di item diversi.

E' necessario considerare due punti. Innanzi tutto, ogni item è indipendente dagli altri (anche nel caso in cui due o più item condividano lo stesso stampo): questa caratteristica possiede un duplice aspetto.

Da un verso spinge la logica della selezione verso un algoritmo di ordinamento dei singoli item ma ciò significa anche che il cliente può ordinare anche un solo item per stampo.

Secondariamente, anche se si creasse un metodo di selezione basato sui singoli item, si sarebbe successivamente costretti ad analizzare anche i prodotti con cui condivide lo stampo di appartenenza.

Ciò significa che se si scegliesse un metodo a item singolo, si creerebbe la possibilità di scegliere un prodotto ordinato spesso ma che appartiene ad uno stampo con articoli poco prodotti.

E' quindi più conveniente considerare direttamente gli stampi ovviando ai problemi che deriverebbero da un ordinamento dei singoli item.

Nei prossimi paragrafi viene descritta la procedura per ottenere la variabile di ordinamento per stampo.

4.1.1 Obiettivo e ipotesi alla base del metodo

L'obiettivo di questo algoritmo è ricercare il tempo di utilizzo in battuta di uno stampo, pesato esponenzialmente sul periodo di attività di tale stampo.

Si è già definito il concetto di *cycle time* nel Paragrafo 2.2.4 come il periodo del ciclo di iniezione.

Uno degli obiettivi di questo progetto è proprio quello di abbassare il tempo di ciclo per ogni stampo iniettato, ma in questa fase è più interessante conoscere quale sia la stima della media di questo tempo.

Tale media può essere utilizzata nell'algoritmo come punto di partenza per l'ordinamento dei tempi. Produttivamente, si considera la seguente media generale:

$$t_{ct} = 2,4 \text{ [min]} \quad (4.1.1)$$

Si definiscono inoltre gli indici, utili ai prossimi passaggi dell'algoritmo:

Indice	Descrizione
l	Indice relativo allo stampo
i	Indice relativo ai singoli item nello stampo
j	Indice relativo all'anno di assunzione dell'ordine
z	Indice relativo al singolo ordine

Tale indicizzazione ha bisogno di essere esposta nei particolari: per comprenderla appieno è anche necessario esporre il sistema Microcast di classificazione dei prodotti.

Tale sistema di classificazione è in vigore fino dalla nascita dell'azienda e si basa sullo stampo di appartenenza.

Il sistema è formato da due spazi: il primo spazio è composto da quattro cifre identificative e il secondo da due.

Il primo spazio rappresenta lo stampo ed è crescente dal più datato al più recente. Per essere più chiari, il primo stampo costruito all'apertura di Microcast è stato lo 0001. Al momento il conteggio è oltre 2700.

Come detto, ogni stampo può avere uno o più item al suo interno. Se nello stampo ce n'è uno soltanto, il secondo numero della classificazione sarà 00, mentre se sono presenti più articoli, essi saranno contrassegnati relativamente con 01, 02 e via dicendo.

Detto ciò, è naturale che gli indici scorrano in funzione di come si imposta il ragionamento. Si è deciso di scorrere gli indici come descritto di seguito:

Indice	Descrizione
l	Scorre gli stampi dal primo ordinato all'ultimo e non considera tutti gli altri parametri
i	Scorre sugli item dell'l-esimo stampo
j	Scorre gli anni dal 2008 al 2013 e dipende dai primi due indici, descrive l'anno in cui è stato ordinato l'i-esimo item dell'l-esimo stampo
z	Scorre gli ordini del j-esimo anno dell'item considerato (indici i e l)

Per chiarezza, il generico termine $x_{l,i,j,z}$ descriverà la variabile x presa dai dati nella riga d'ordine z , dell'anno j , dell'i-esimo item dello stampo l .

Si definiscono inoltre le variabili:

Variabile	Descrizione
$\alpha_{l,i}$	Anno in cui l'item è stato ordinato per la prima volta (ossia il primo anno in cui $z \neq 0$); definisce l'anno in cui l'item è stato attivato
$Ni_{l,i}$	# Impronte del i-esimo item all'interno dello stampo di appartenenza
$V ord_{l,i,j,z}$	Volume produttivo ordinato dell'i-esimo item per il j-esimo anno nello z-esimo ordine

4.1.2 Descrizione dell'algoritmo

Si procede ora con la descrizione passo-passo della procedura atta a ricercare la variabile di ordinamento degli stampi utilizzando le variabili definite precedentemente.

La procedura viene divisa in vari *step*, in modo tale da risultare il più chiara possibile. Si descrivono le singole operazioni sui dati in formato indicizzato e si fornisce per ognuna una breve spiegazione.

Tutte le operazioni sono state effettuate su un unico file Excel©, diviso anch'esso in passaggi del tutto simili a quelli descritti.

Step 1

Viene indicizzato il tempo in minuti dedicato all'iniezione della singola impronta per ogni riga d'ordine.

$$t1_{l,i,j,z} = \frac{t_{ct} V ord_{l,i,j,z}}{Ni_{l,i}} \text{ [min]} \quad (4.1.2)$$

In breve, essendo Ni il numero di impronte di un item all'interno del suo stampo, $t1$ descrive il tempo che viene dedicato ad un'impronta moltiplicato per il volume di pezzi da produrre, posto che $t_{ct} = 2,4$ min.

Step 2

Si dispongono i dati secondo l'indice j (anni) dei tempi di iniezione tramite una Pivotizzazione della tabella: sommando poi tutti gli ordini dello stesso anno viene isolato $t1$.

Tramite questo passaggio, si ricerca il minutaggio dedicato alla singola impronta per ogni anno.

$$t_{2,i,j,z} = \sum_z t_{1,i,j,z} = \frac{t_{ct} \cdot \sum_z V_{ord_{l,i,j,z}}}{Ni_{l,i}} \text{ [min]} \quad (4.1.3)$$

Durante *Step 2*, sfruttando ancora le caratteristiche della pivotizzazione, si ricerca inoltre la variabile $\alpha_{l,i}$ come è stata definita precedentemente.

Step 3

Si prosegue con una sommatoria pesata sull'indice j .

L'obiettivo di questo passo è sommare i t_2 sull'indice relativo all'anno dell'ordine. La pesatura ha invece l'obiettivo di far risaltare gli ordinativi più recenti.

Al fine di stimare la pesatura più consona alla situazione è stata svolta un'analisi di sensitività dei dati utilizzando tre vettori diversi. Considerando la generica pesatura, l'operazione sui dati è così definita:

$$t_{3,l,i} = \sum_j (t_{2,l,i,j} \cdot \text{sens}_j) \text{ [min]} \quad (4.1.4)$$

sens rappresenta il generico vettore di sensitività. Esso è così definito:

$$\text{sens} = [\text{sens}_{2008} \text{ sens}_{2009} \cdots \text{sens}_{2013}] \quad (4.1.5)$$

Dove $\text{sens}_{2013} = 1$ mentre le posizioni con indice j minore andranno a diminuire sempre più, in modo che venga data più importanza agli ordini recenti.

L'analisi di sensitività viene svolta con tre vettori diversi, riportati di seguito. I relativi andamenti sono riportati in Figura 4.1.1:

$$\underline{\text{sens}}_{\text{exp2}} = [2^{-5} \ 2^{-4} \ \cdots \ 2^0] \quad (4.1.6)$$

$$\underline{\text{sens}}_{\text{exp3}} = [3^{-5} \ 3^{-4} \ \cdots \ 3^0] \quad (4.1.7)$$

$$\underline{\text{sens}}_{\text{lin}} = \left[\frac{1}{6} \ \frac{1}{3} \ \cdots \ 1 \right] \quad (4.1.8)$$

Per analizzare gli effetti delle diverse pesature è necessario concludere la procedura in corso, poiché per ora non è possibile avere termini di confronto plausibili.

Vengono portate avanti nella procedura tutte le pesature e in seguito si verificherà la migliore delle ipotesi.

A questo punto viene anche eseguita una media della variabile t_3 sul periodo di attività dell'item. Si definisce quindi la variabile $t_3 m$:

$$t_3 m_{l,i} = \frac{t_{3l,i}}{2014 - a_{l,i}} \text{ [min]} \quad (4.1.9)$$

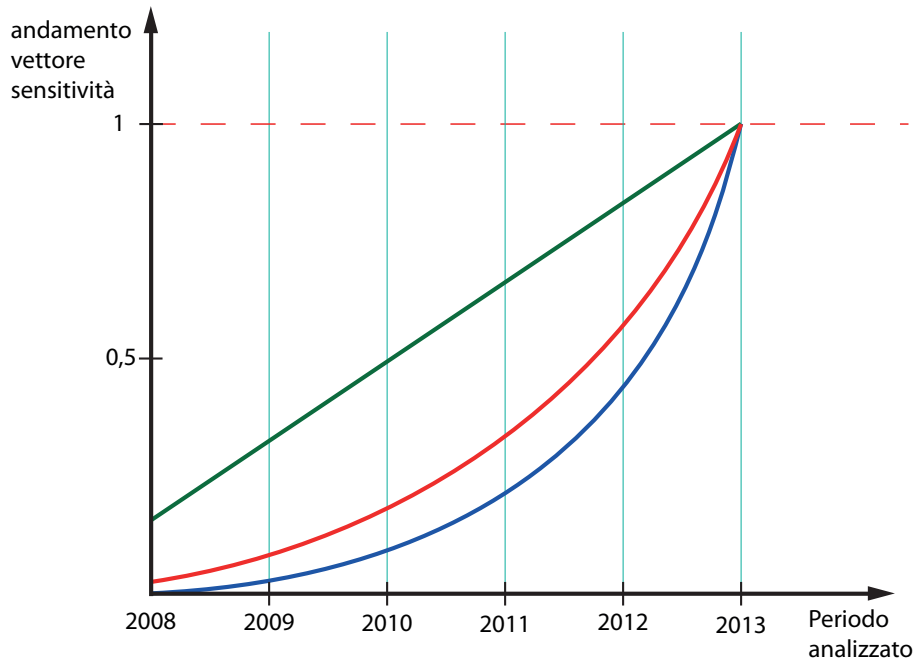


Figura 4.1.1: Andamento dei diversi vettori di pesatura

Step 4

Come riportato a Pagina 84, si è deciso di avere un parametro basato sullo stampo e non sull'item; Step 4 si concentra su questo aspetto.

Al fine di ottenere un indice di ordinamento plausibile, la scelta più ovvia potrebbe ricadere su una somma tra i vari $t_3 m$ ottenuti. In questo modo si avrebbero dei tempi di iniezione totali per ogni stampo.

Questa operazione non è però la scelta ottimale. La produzione viene programmata in modo che sia utilizzato il minimo tempo: ciò significa che se due ordini di item appartenenti allo stesso stampo presentano due date di consegna diverse, si preferisce iniettarli insieme ed eventualmente conservare i modelli in cera per alcuni giorni (o immagazzinare i grezzi di fusione) invece che occupare le presse in momenti distinti.

Tabella 4.1.1: Le prime posizioni della graduatoria in funzione del vettore di pesatura utilizzato.

PN	Graduatorie		
	exp2	exp3	lin
2577	1	1	2
1341	2	2	1
1816	3	3	3
1610	4	4	6
0802	5	5	7
1612	6	13	5
2217	7	7	8
2442	8	8	10
2307	9	9	9
2668	10	6	22
1603	11	11	11
2163	12	10	16
2162	13	12	15
1455	14	35	4

E' perciò escluso eseguire una somma dei $t_3 m_i$; una stima più accurata è rappresentata dal massimo valore di $t_3 m_i$ tra gli item di uno stampo, ottenendo così la variabile di ordinamento voluta.

$$t_{fin_i} = \text{Max}_i(t_3 m_{i,i}) \text{ [min]} \quad (4.1.10)$$

Al fine di ottenere la graduatoria da analizzare è quindi necessario ordinare gli stampi secondo t_{fin_i} decrescente.

Risultati dell'analisi di sensitività

A questo punto è possibile anche analizzare i risultati dell'analisi di sensitività sui diversi vettori di pesatura. Si può notare che i due vettori con andamento esponenziale hanno effetti quasi identici sui dati.

Il vettore lineare, invece porta a dei risultati leggermente diversi come si nota in Tabella 4.1.1.

Osservando i dati in Tabella 4.1.1, si nota che uno degli stampi che ha scalato più posizioni grazie alla pesatura lineare è 1455.

Nel caso specifico di questo stampo, i cui item sono stati ordinati in grandi volumi nell'anno 2008, le pesature esponenziali schiacciano quasi totalmente gli ordini meno recenti (addirittura con *exp3* finisce alla posizione #35) mentre la pesatura lineare non dà gli stessi risultati. Al contrario, *exp3* taglia quasi completamente tutto ciò che è stato ordinato prima del 2012. Si utilizzerà perciò la pesatura *exp2*, che rappresenta un trade-off tra le tre opzioni.

$$\underline{\text{sens}}_{\text{exp2}} = [2^{-5} \ 2^{-4} \ \dots \ 2^0] \quad (4.1.11)$$

4.1.3 Commenti ai risultati dell'ordinamento

La procedura descritta mira ad ottenere un metodo di ordinamento ottimale ma non potrà che essere solo e soltanto una via da seguire.

Tale ordinamento pone la sua attenzione sui tempi di iniezione ma tralascia completamente le caratteristiche geometriche degli item considerati. Scegliendo di seguire il modello descritto, sarà necessario scontrarsi con le limitazioni da esso imposte. Il metodo ordina gli stampi ma la scelta dovrà essere effettuata anche tramite l'esperienza tecnica personale e ad informazioni di tipo strategico.

Alcuni degli stampi selezionati per la sperimentazione successiva a questa trattazione non saranno quindi nelle prime posizioni della graduatoria imposta dal metodo di ordinamento.

In alcuni casi lo stampo è ancora nuovo e non ha ancora un *t fin* abbastanza elevato per entrare nelle posizioni alte della graduatoria; è ritenuto però strategico per il futuro dell'azienda.

Tali stampi non possono essere individuati perché il metodo ragiona nel passato degli ordini ma non fa previsioni di alcun genere.

In altri casi, anche se il singolo stampo ha un *t fin* basso e le quantità ordinate sono basse, esistono gruppi di codici molto simili divisi in altrettanti stampi che, se raggruppati, finirebbero sicuramente nella zona alta dell'ordinamento.

Un ultimo caso è rappresentato da quegli stampi che hanno *t fin* bassi e non sono nemmeno molto comuni ma sono complicati da iniettare o hanno caratteristiche morfologiche particolari.

La selezione di questi stampi non ha nulla a che vedere con l'ordinamento descritto ma solo con l'esperienza e la conoscenza accumulate in azienda a proposito dei vari prodotti con cui si a che fare ogni giorno.

Schematicamente, tali scelte dettate dall'esperienza possono essere descritte in Figura 4.1.2.

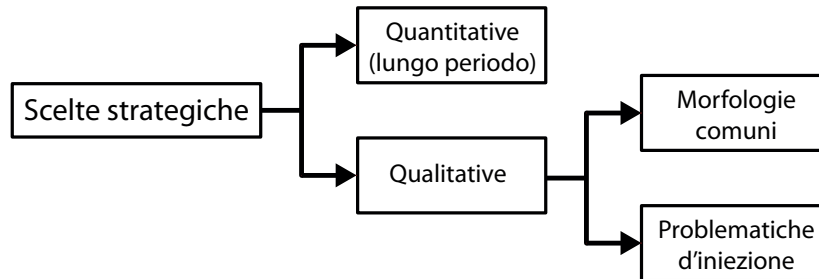


Figura 4.1.2: Le varie scelte strategiche al di fuori del metodo di ordinamento

Considerando le limitazioni descritte si cercherà comunque di analizzare prima gli stampi che sono nella fascia alta della graduatoria inizializzata grazie al metodo di ordinamento.

Per definire cosa significhi "fascia alta" si può svolgere un'analisi ABC dell'ordinato per capire le tre fasce tipiche del metodo.

In Figura 4.1.3 si riportano i grafici risultanti da tale analisi.

Dal grafico della cumulata si nota che fino alla posizione #176 della graduatoria (circa il 20% del totale degli stampi) si staziona nella fascia A, ossia nella fascia che comprende l'85% della sommatoria dei t_{fin} .

Selezionando gli stampi da questa fascia si avrà comunque la sicurezza di compiere una scelta strategica al fine di utilizzare i risultati delle analisi per scopi produttivi.

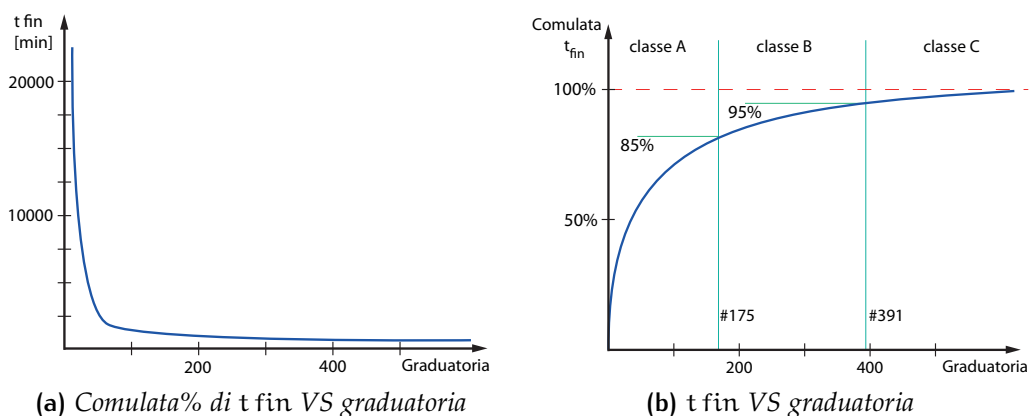


Figura 4.1.3: Grafici relativi all'analisi ABC sugli stampi in graduatoria

4.2 PREPARAZIONE ALL'ESPERIMENTO DI SCREE- NING

In questa sezione viene descritto il procedimento per ottenere il numero di repliche necessario e sufficiente per costruire l'esperimento fattoriale per lo screening dei parametri.

Al fine di valutare questo aspetto del problema è necessario sfruttare le tecniche di *process capability* e stimare poi la variabilità naturale del processo di iniezione della cera.

Questo esprime la variabilità che possiede un sistema produttivo (o una fase di esso), senza alcun intervento correttivo manuale e/o eventuali fattori esogeni.

In ambito ingegneristico si assume convenzionalmente che la tolleranza naturale di un processo copra un'ampiezza di $\pm 3\sigma$ dell'intera tolleranza industriale del suddetto processo. Da qui il termine 6σ , che descrive l'insieme degli studi riguardanti CP.

Nel caso in questione, non si è interessati a tale tolleranza, ma alla stima della deviazione standard che meglio descrive la fase di iniezione; tale termine è necessario al calcolo del numero di repliche da eseguire durante la sperimentazione vera e propria.

Il numero di repliche si può stimare grazie ad un *test di potenza*, che al netto di alcune informazioni sul processo da studiare (come appunto la variabilità del processo stesso), calcola il minimo numero di repliche da eseguire.

Al fine di ottenere tali informazioni si deve passare da un esperimento di CP e da una corretta rilevazione dei dati.

Di seguito vengono descritte le peculiarità di tale esperimento, da ora nominato *pre-screening*, l'analisi dei dati che ne segue e le conclusioni che se ne traggono.

4.2.1 L'esperimento di pre-screening

L'esperimento di CP è stato eseguito sulla pressa LC55 durante un periodo di produzione effettiva.

È stato selezionato uno stampo che doveva essere iniettato durante la settimana lavorativa e sono state date istruzioni precise all'operatore, senza interferire successivamente con il suo lavoro.

E' stato scelto lo stampo 2648, che si trova alla posizione #64 della graduatoria descritta nella Sezione 4.1.

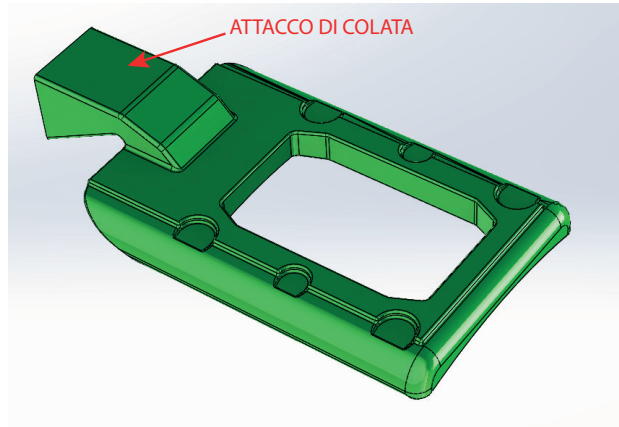


Figura 4.2.1: Schizzo di mod.2648-08

Lo stampo ammette la presenza di undici codici al suo interno: si è selezionato il modello del codice 2648-08 perché è sicuramente il più interessante a livello geometrico tra i disponibili.

Si può osservare la geometria di mod.2648-08 in Figura 4.2.1; è inoltre riportato in Appendice C un disegno semplificato del modello completo delle dimensioni più importanti.

Una volta terminato il processo, l'item 2648-08 viene utilizzato come piastrina di fissaggio in una macchina automatica per l'impacchettamento.

In tabella 4.2.1 sono riassunti i parametri d'iniezione standard per lo stampo 2648.

Tabella 4.2.1: Parametri di iniezione per lo stampo 2648

Parametro	Valore
T_1 [°C]	60
T_2 [°C]	23
q [$\frac{cm^3}{s}$]	35
P [bar]	20
t_{tot} [s]	60

Come si può osservare in Figura 4.2.1 il modello è caratterizzato da un foro rettangolare passante e parallelo alla direzione di estrazione del pezzo dallo stampo.

Il foro di dimensioni importanti rende le sezioni di passaggio della cera piuttosto ristrette, le quali sono collegate alla zona della colata, molto più massiva del resto del particolare.

La zona della colata è anche quella a cui è collegato il condotto di ingresso della cera all'interno dello stampo; così facendo, l'afflusso di cera durante il raffreddamento viene mantenuto dove il ritiro sarà più accentuato.

Teoricamente, queste caratteristiche fanno sì che le dimensioni legate alle sezioni di passaggio siano piuttosto variabili, unitamente al ritiro percentuale della cera nelle zone più lontane dalla sezione di ingresso del materiale.

Si è deciso di basare l'esperimento su N°30 modelli in cera dell'item selezionato, divisi in tre turni d'iniezione. Un turno è diviso dal successivo da uno spurgo prestabilito del sistema.

Ciò consentirà un numero importante di dati da analizzare e permetterà inoltre lo studio preliminare di una possibile variabile del processo come lo spurgo prestabilito.

Sono state inoltre impartite all'operatore della pressa le seguenti istruzioni da rispettare durante la sperimentazione, atte a minimizzare le possibili fonti di variabilità:

- Utilizzare solo i valori standard dei parametri d'iniezione associati allo stampo
- Non intervenire mai sui parametri d'iniezione per tutta la durata dell'esperimento
- Estrarre e posizionare i modelli come se fossero dedicati ad una normale produzione
- I modelli da dedicare all'esperimento devono essere estratti da stampate consecutive
- Ogni dieci stampate eseguire uno spurgo del sistema
- Conservare i modelli numerati e ordinati in zona climatizzata al fine di ottenere un corretto raffreddamento della cera

4.2.2 Misurazione dei modelli

Al fine di isolare la variabilità naturale del processo è fondamentale selezionare attentamente le caratteristiche del particolare da misurare.

Per un'analisi di [CP](#) è consigliabile scegliere caratteristiche numeriche che ammettano una misurazione ripetibile e facile da eseguire.

Si escludono quindi tutte le caratteristiche legate a variabili visive (linee di flusso, giunti freddi, etc.) e/o legate alla forma (avvallamenti, rigonfiamenti, etc.) poiché sono misure poco ripetibili e molto influenzate dal fattore umano.

Si vira perciò su caratteristiche dimensionali linear. Come detto nel paragrafo precedente, le dimensioni lineari più variabili di questo particolare sono quelle legate al foro rettangolare centrale.

Sono state selezionate quattro dimensioni caratteristiche di mod.2648-08, evidenziate in Figura 4.2.2, tutte misurabili con un semplice calibro corsoio.

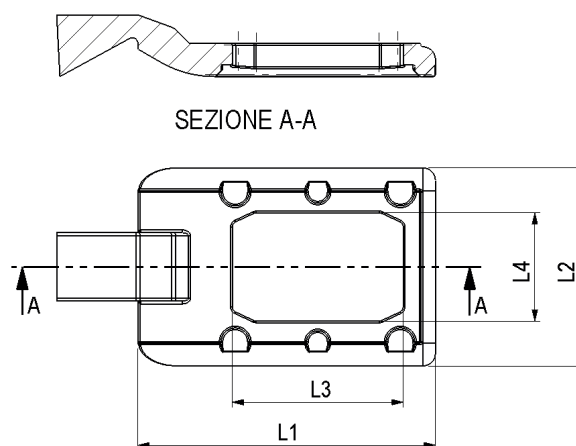


Figura 4.2.2: Dimensioni misurate a valle dell'esperimento di pre-screening

Per ogni variabile sono state previste N°4 repliche di misura. E' stata effettuata una casualizzazione sulla replica ma non tra le variabili, ossia, l'ordine con cui sono stati misurati i pezzi varia per ogni replica ma l'ordine di una stessa replica è uguale per tutte le variabili.

Sfruttando questo tipo di casualizzazione, è stato possibile misurare tutte le caratteristiche di seguito per un singolo modello per poi passare al successivo.

Di seguito sono riportate brevemente il numero di misurazioni dell'esperimento:

Livelli	30
Repliche	4
Variabili misurate	5
<hr/>	
N° misurazioni TOT	600

4.2.3 Analisi dei dati

La replicazione casualizzata delle misurazioni è stata effettuata per ridurre la variabilità causata dalla misura stessa.

Non si tratta in ogni caso di una replicazione dei trattamenti: non si possono quindi considerare tutti i dati raccolti ma è necessario mediare sulla replicazione di misura in modo da avere solo N°30 dati per dimensione considerata.

Di seguito è riportata l'analisi di correlazione tra le quattro popolazioni di dati al fine di stabilire le relative interdipendenze (Tabella 4.2.2).

L'indice riportato in tabella per ogni coppia di variabili è il P-Value del test di correlazione: se questo è minore di α ($= 0,05$), esiste una dipendenza tra le due dimensioni.

Si sono sottolineati in rosso i valori dei P-Value relativi alle coppie non correlate.

Questa e tutte le successive analisi sui dati sono state eseguite tramite il software Minitab¹⁶ mentre le nozioni teoriche applicate sono consultabili in [5].

Tabella 4.2.2: Analisi di correlazione tra le caratteristiche misurate

	L ₁	L ₂	L ₃
L ₂	0,000		
L ₃	0,000	0,002	
L ₄	0,001	0,011	0,892

In Tabella 4.2.3 è stata inoltre riportata l'analisi di statistica descrittiva per individuare le caratteristiche principali delle singole popolazioni.

Al netto di queste prime analisi è già possibile orientarsi su che popolazione analizzare per ricercare l'indice di variabilità della fase di iniezione. La tabella relativa alla correlazione indica che L₁, L₂, ed L₃ sono tra loro completamente dipendenti ed è perciò inutile analizzarle tutte.

A tal proposito era prevedibile l'interdipendenza L₁ – L₂, entrambe dimensioni libere di ritirare nello stampo durante il raffreddamento. Esse

Tabella 4.2.3: Statistica descrittiva delle caratteristiche misurate

Variabile	Media	StDev	$\frac{StDev}{Media}$	MIN	MAX
L ₁	52,715	0,0152	$2,883 \cdot 10^{-4}$	52,680	52,735
L ₂	35,035	0,0120	$3,425 \cdot 10^{-4}$	35,012	35,060
L ₃	30,406	0,0168	$5,525 \cdot 10^{-4}$	30,372	30,435
L ₄	19,257	0,0132	$6,854 \cdot 10^{-4}$	19,225	19,278

ritirano quindi in egual modo e sarebbe stato perciò sorprendente non trovare una dipendenza.

Lo stesso discorso dovrebbe valere per la coppia L₃ – L₄ ma questo è un caso ben più complesso.

Tali dimensioni sono caratterizzate da un ritiro vincolato dalla parte di stampo che forma la geometria del foro rettangolare: il ritiro percentuale è perciò praticamente azzerato durante il raffreddamento della cera nello stampo. Il ritiro avviene solo una volta estratti i modelli, a cera già stabile. Ciò rende molto complesso il problema, facendo intervenire fattori tra le quali la tensione residua del materiale solidificato, differente nelle due direzioni.

E' possibile che tali fattori portino ad un comportamento differente da parte delle due dimensioni, come segnala il valore di correlazione in tabella.

Per quanto riguarda l'indice di correlazione della coppia L₁ – L₃, si può affermare che esiste differenza tra le modalità di ritiro ma che allo stesso tempo si osserva una forte correlazione tra le due dimensioni per valore, direzione e posizione.

Era quindi prevedibile una dipendenza tra queste due dimensioni. Lo stesso discorso vale per la coppia L₂ – L₄

Analizzando le statistiche descrittive in Tabella 4.2.3 si nota come la deviazione standard delle quattro lunghezze sia piuttosto regolare.

Se però si osserva la colonna dedicata ai valori di $\frac{StDev}{Media}$, elaborata in Tabella 4.2.4, si può osservare come la situazione cambi.

Si nota come la caratteristica L₄ sia la più variabile in relazione con il valore della media e per questa ragione sarebbe la candidata principale per un'analisi più approfondita.

Le analisi sulla popolazione mediata L₄ hanno però rivelato che i dati in questione appaiono non normali, distorti e non migliorabili con nessuna trasformazione (box-cox o tramite espansioni in serie di Taylor).

Variabile	StDev	$\frac{\text{StDev}}{\text{Media}}$
L ₁	0,0152	$2,883 \cdot 10^{-4}$
L ₂	0,0120	$3,425 \cdot 10^{-4}$
L ₃	0,0168	$5,525 \cdot 10^{-4}$
L ₄	0,0132	$6,854 \cdot 10^{-4}$

Tabella 4.2.4: Elaborazione della statistica descrittiva per le caratteristiche misurate

Per questioni di spazio tali analisi non vengono qui riportate ma a rimarcare tale differenza si osservino i due grafici in Figura 4.2.3: il test di normalità dei dati mediati della popolazione L₃ risponde positivamente al test mentre quello relativo a L₄ ammette un p-value che non permette l'accettabilità del test.

Naturalmente, tale non normalità della popolazione L₄ permane anche nei residui in uscita dall'ANOVA eseguita rispetto alla variabile *spurgo*; si è perciò ritenuto necessario passare ad un'altra caratteristica.

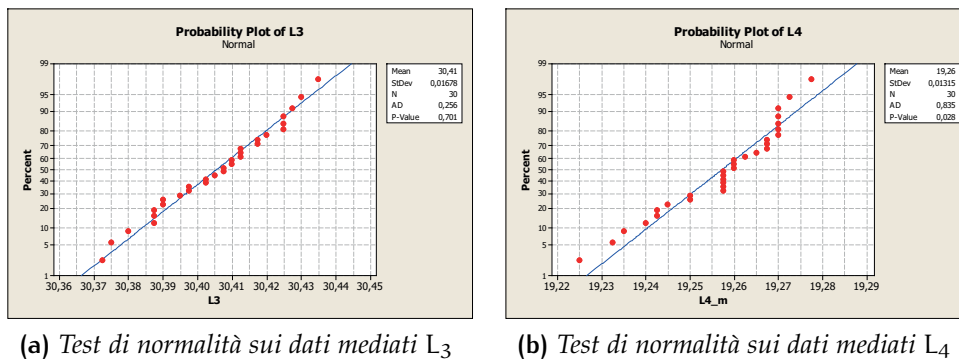


Figura 4.2.3: Confronto tra i test di normalità di L₃ e L₄

Per stabilire la variabilità della fase d'iniezione si analizzano quindi i dati relativi ad L₃, simili per deviazione standard a L₄ ma molto più regolari ed affidabili.

Si riporta ora l'analisi dei dati riguardanti L₃.

Nelle Figure 4.2.4 si può osservare la morfologia della popolazione di dati raccolti.

Lo scatter plot 4.2.4a riporta la nuvola di dati non differenziata per repliche mentre l'individual plot 4.2.4b mostra una differenziazione per replica di misura.

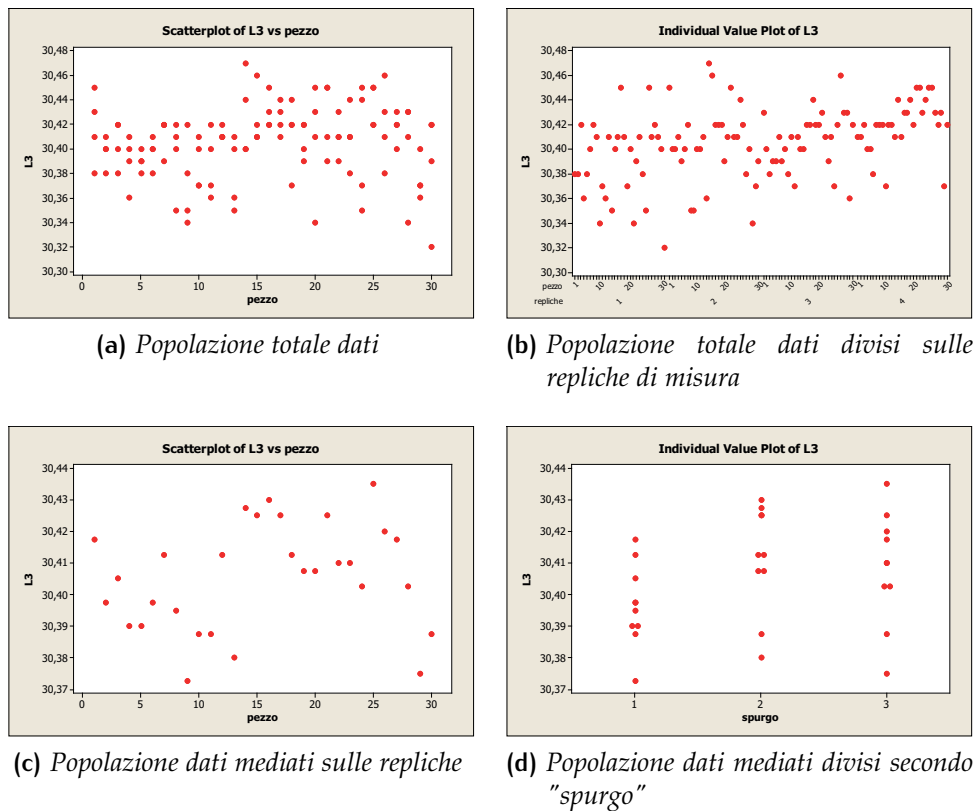


Figura 4.2.4: Grafici relativi ai dati L_3

Si può notare che i dati sono piuttosto compatti e regolari, tranne alcuni presunti outliers evidenziati anche successivamente, durante l'analisi della varianza.

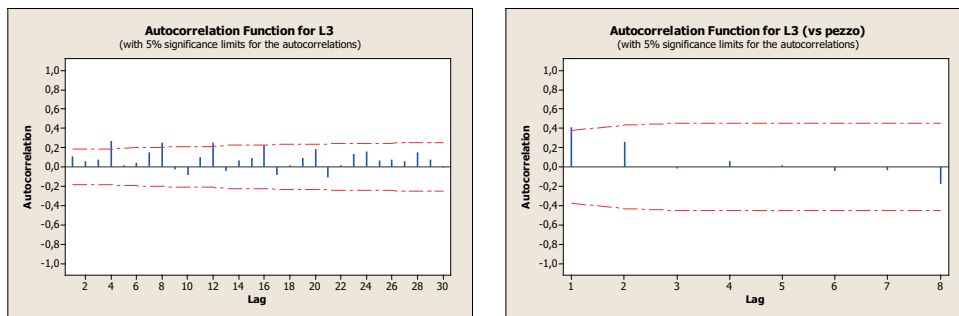
In Figura 4.2.4c viene mostrata la stessa nuvola di Figura 4.2.4a ma mediata sulle repliche di misura: come si può osservare, gli outliers diminuiscono per importanza.

Come si è detto precedentemente, si analizza la popolazione L_3 relativamente alla sua variabilità in funzione del parametro *spurgo*. Come detto a Pagina 94, tale parametro descrive lo spurgo prestabilito del sistema di iniezione della cera.

Relativamente a questo discorso, in Figura 4.2.4d si è riportato un individual plot dei dati mediati divisi per *spurgo*.

Per verificare la correttezza dei dati, sono state svolte due analisi di autocorrelazione.

In Figura 4.2.5a si può osservare l'analisi relativa al run-order di misu-



(a) Analisi di autocorrelazione sul run-order di misura (b) Analisi di autocorrelazione sul run-order d'iniezione ("pezzo")

Figura 4.2.5: Analisi di autocorrelazione

ra. Tale analisi verifica che la misura non dipenda dalle precedenti. In caso contrario, la casualizzazione di misura sarebbe stata corrotta da una modalità di misura errata e/o poco consona.

Nel caso in esame si può notare come l'indice relativo ad ogni passo del lag sia sempre sotto il valore soglia ($T = 2$).

In Figura 4.2.5b è stata svolta la stessa analisi sul run-order relativo all'iniezione. In questo modo si mira a verificare l'assenza di dipendenza tra una stampata della pressa e le successive.

Anche in questa analisi non presenta risultati che rendono non valido l'esperimento.

Analisi della varianza con fattore "spurgo"

Al fine di stabilire la relazione tra la caratteristica L_3 e la variabile *spurgo* sono state utilizzate le tecniche di analisi della varianza (ANOVA).

Viene eseguita ANOVA General linear model con fattori casuali.

L'unico fattore rientrante nell'analisi è appunto *spurgo*; la ragione per cui si è deciso di trattare *spurgo* come fattore casuale risiede nel fatto che i livelli di tale fattore non sono i livelli di interesse dell'esperimento.

In realtà, essendo un'analisi riguardante la CP, il fattore è solo un'azione attiva che potrebbe influenzare l'unico livello dell'esperimento.

In Figura 4.2.6 è presente la tabella ANOVA dell'analisi descritta.

Prima di commentare i risultati si verificano le ipotesi del modello: i grafici in Figura 4.2.7 sintetizzano le verifiche necessarie e sufficienti all'idoneità del modello ANOVA.

```

General Linear Model: L3 versus spurgo

Factor Type Levels Values
spurgo random 3 1; 2; 3

Analysis of Variance for L3, using Adjusted SS for Tests

Source DF Seq SS Adj SS Adj MS F P
spurgo 2 0,0012600 0,0012600 0,0006300 2,46 0,104
Error 27 0,0069075 0,0069075 0,0002558
Total 29 0,0081675

S = 0,0159948 R-Sq = 15,43% R-Sq(adj) = 9,16%

Unusual Observations for L3

Obs L3 Fit SE Fit Residual St Resid
13 30,3800 30,4115 0,0051 -0,0315 -2,08 R
29 30,3750 30,4085 0,0051 -0,0335 -2,21 R

Variance Components, using Adjusted SS

Source Estimated Value
spurgo 0,00004
Error 0,00026

```

Figura 4.2.6: Report della tabella ANOVA GLM L_4 vs *spurgo*

In Figura 4.2.7a è rappresentato il grafico RES-FITS, che mette in relazione i residui del modello e i valori dei relativi valori calcolati dal modello: le varianze sui livelli del fattore paiono regolari e non sembra esistano trend di sorta sui vari livelli.

La normalità dei residui è verificata tramite i grafici nelle Figure 4.2.7b e 4.2.7c.

Rispettivamente, il primo rappresenta l'istogramma dei residui del modello, mentre il secondo è il test di normalità degli stessi. Il risultato del test di Anderson-Darling visibile su quest'ultimo conferma l'adeguatezza.

In ultimo, si riporta il grafico relativo alla verifica di uguaglianza delle varianze sui livelli in Figura 4.2.7d: il risultato del test di Levene conferma anche in questo caso l'adeguatezza del modello ANOVA.

L'indipendenza dal run-order è già stata trattata precedentemente.

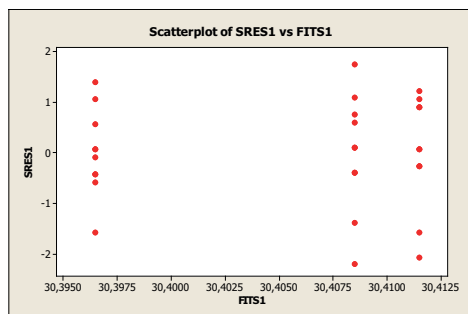
In generale si può quindi affermare che il modello è adeguato e si possono accettare i risultati della tabella ANOVA.

Come si può osservare dal valore del P-Value risultante del modello in Figura 4.2.6, la variabile *spurgo* non è significativa e perciò si rifiuta l'ipo-

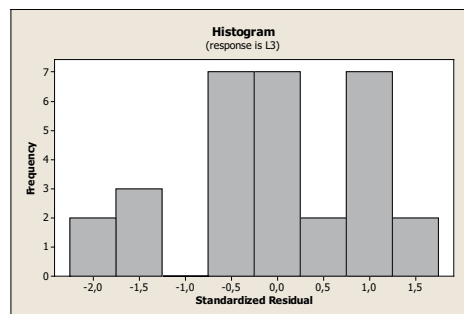
tesi alternativa H_1 : si può quindi affermare che, al netto di questa analisi, *spurgo* non influenza la caratteristica L_3 .

Osservando la tabella ANOVA si può anche osservare quanto incida l'errore sul modello a fattori casuali. Tale affermazione è giustificata dal valore molto basso dell'indice R_{adj} e dal valore importante della componente di varianza dell'errore (calcolabile solo con modello a fattori casuali) rispetto a quella del fattore *spurgo*.

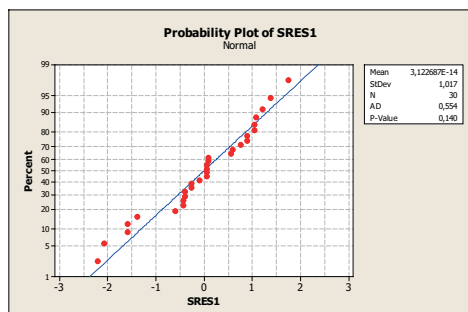
Al netto di questo risultato e per il fatto che non si vuole appesantire ulteriormente la sperimentazione principale della trattazione, non si utilizzerà come blocco la variabile studiata.



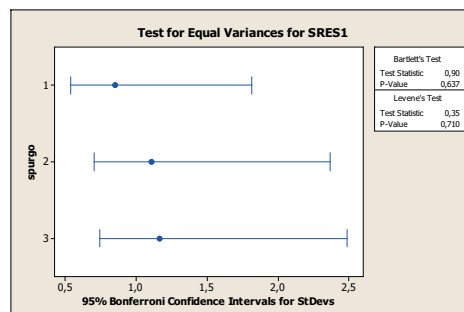
(a) Scatter plot RES-FITS



(b) Istogramma dei residui



(c) Test di normalità dei residui



(d) Test di uguaglianza delle varianze

Figura 4.2.7: Grafici relativi all'analisi della varianza L_3 vs *spurgo*

4.2.4 Il test di potenza

La potenza di un test è definita in 4.2.1, dove β è l'errore di seconda specie di un test statistico.

$$P = 1 - \beta \quad (4.2.1)$$

Nella pratica, la potenza è la possibilità di ottenimento di risultati corretti in un test statistico.

In altre parole, se una dipendenza tra due variabili è realmente significativa e si mantiene una potenza $P = 0,3$ per verificare tale dipendenza, si ha il 30% di possibilità che il test relativo abbia esito positivo (ipotesi alternativa verificata).

È perciò essenziale mantenere una potenza elevata, altrimenti lo sperimentatore non può essere sicuro dei risultati ottenuti durante i test.

Per stimare il numero di repliche di misura per l'esperimento di screening è necessario effettuare un test di potenza sfruttando i dati relativi al pre-screening.

Qualsiasi test di questo tipo necessita di alcuni dati in ingresso:

Variabile	Descrizione
P	Potenza del test
σ_{\max}	Deviazione standard massima del processo, stima della variabilità naturale
d	Minima differenza tra le medie cui si è interessati

Nel caso in questione, vengono utilizzati i seguenti valori:

$$P = 0,8 \quad (4.2.2)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{L3} \quad (4.2.3)$$

Il valore del minimo scarto tra le medie è frutto di un ragionamento dettagliato, riportato di seguito.

Rilevamento della minima differenza tra le medie

La stima della minima differenza tra le medie per il test di potenza è un passaggio essenziale.

Se si è interessati ad un valore di d che è relativamente molto più piccolo della variabilità naturale del processo (σ_{L3} nel caso in questione), significa che l'esperimento necessita di molte repliche poiché l'errore verrà mediato attraverso di esse durante l'analisi ANOVA.

Al contrario, se d è uguale o maggiore della stima della variabilità, l'accuratezza necessaria risulta molto minore e si ottiene una replicazione molto meno spinta; l'analisi non sarà però in grado di individuare gli effetti meno evidenti.

In generale vale la regola:

$$\frac{\sigma_{\max}}{d} \propto n \quad (4.2.4)$$

E' perciò molto importante investire del tempo per individuare un giusto trade-off tra i due estremi.

L'obiettivo minimo di un'analisi di questo tipo è individuare quando un particolare risulta scarto oppure no. Nel caso in esame, in cui si sono prese in considerazione delle dimensioni fisiche del particolare, lo scarto è identificato da una tolleranza assegnata in fase di contrattazione con il cliente.

Al fine di identificare il parametro d è quindi necessario considerare la differenza tra la variabilità di una dimensione lineare su di un grezzo di fusione e quella relativa ad un modello in cera.

Le considerazioni in questione sono le medesime che sono state descritte per caratterizzare le non conformità dimensionali, nel Paragrafo 3.2.9.

Secondo le analisi svolte nei precedenti paragrafi, la dimensione $L3$ del modello 2648-08 si distribuisce come di seguito:

$$L3 \sim N(\mu_{L3}, \sigma_{L3}^2) = N(30,406, 0,0168^2) \quad (4.2.5)$$

Partendo dalle ipotesi descritte nel Paragrafo 3.2.9, si ragiona sul confronto tra la variabilità di $L3$ e quella del campo di tolleranza I_{D3} , che come si è visto può essere preso come indice della variabilità di un modello in cera.

Sapendo qual'è l'andamento di I_{D3} in funzione del valore della quota lineare, si può calcolare l'intervallo di riferimento con valore centrato sulla media μ_{L3} .

$$\begin{aligned} I_{D3}(L3) &= 0,193 + (3,44 \cdot 10^{-3}) \cdot \mu_{L3} & (4.2.6) \\ &= 0,2976 \quad [\text{mm}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{cera}}(L3) &= \frac{I_{D3}(L3)}{2} & (4.2.7) \\ &= [LTL_{L3} : UTL_{L3}] \\ &= [30,332 : 30,481] \\ &= 30,406 \pm 0,074 \quad [\text{mm}] \end{aligned}$$

Conoscendo ora il range determinato dalla tolleranza imposta dal processo, è necessario porla in relazione con la variabilità naturale riscontrata durante l'esperimento di pre-screening.

Si ricerca la minima variazione tra le medie che può interessare lo sperimentatore: in questo senso si ragiona in funzione della percentuale di scarti del particolare considerato nel pre-screening.

Si può considerare come minima variazione interessante il campo che separa uno dei limiti imposti dal processo (ad esempio UTL_{L3}) dal punto sulla normale $N(\mu_{L3}, \sigma_{L3}^2)$ che individua la percentuale di scarto consentito per questo item.

Tale percentuale è comunemente individuata tramite gli indici di CP ma l'item studiato non è un particolare soggetto a normative che necessitano di analisi di capacità.

Per particolari di questa dimensione, l'ufficio qualità Microcast accetta uno scarto percentuale del 10%.

Tramite *Minitab 16*© si cerca il punto della curva $N(\mu_{L3}, \sigma_{L3}^2)$ che individua lo scarto considerato; si ricerca il limite superiore dell'intervallo che comprende il 90% dei grezzi, ossia quei pezzi che ammettono la quota L_3 in quello stesso intervallo.

Siccome per comodità si vuole considerare solo una delle due code, si è impostato di ricercare il 5% sulla parte destra della curva per poi riportare il risultato con UTL_{L3} (si consulti il risultato dell'operazione in Figura 4.2.8).

Per concludere è necessario calcolare la differenza tra i due limiti imposti.

$$UL_{L3 10\%} = 30,450 \quad [\text{mm}]$$

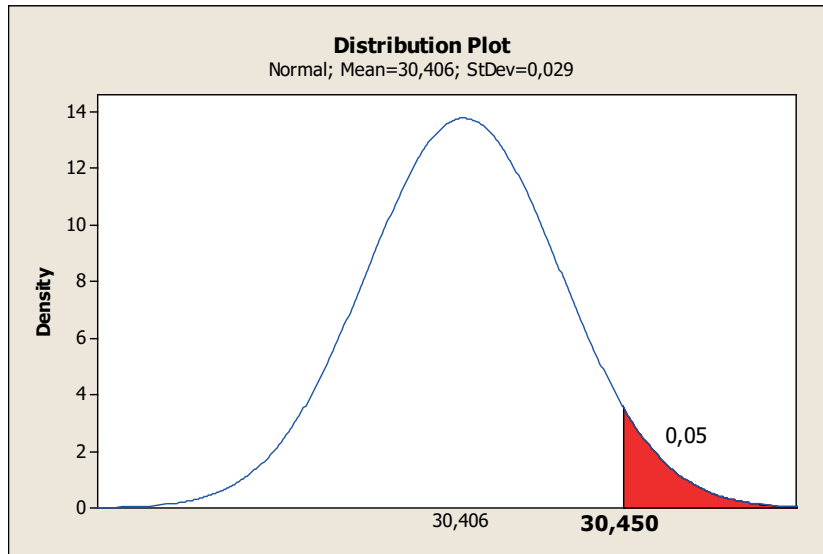


Figura 4.2.8: Ricerca del valore che individua il 10% di scarto totale su mod. 2648-08

$$\begin{aligned}
 d &= UTL_{L3} - UL_{L3\ 10\%} & (4.2.8) \\
 &= 30,481 - 30,450 \\
 &= 0,031 \quad [\text{mm}]
 \end{aligned}$$

Esecuzione del test di potenza

Per ricavare il numero di repliche adatto per mantenere una potenza di $P = 0,8$ nelle analisi di screening rimane solo l'esecuzione del test finale.

Si utilizza l'ambiente *Power and Sample size* di *Minitab 16*© per ricavare il numero di repliche nell'ambito di un'analisi ANOVA a due livelli (come il successivo esperimento di screening).

Il programma richiede di impostare i valori delle seguenti variabili:

Variabile	Descrizione
k	Numero di fattori che verranno studiati durante lo screening
<i>Corner points</i>	Numero di esperimenti totali eseguiti
<i>Center points</i>	Numero di punti centrali che verranno utilizzati
d	Effetto del test. Minimo scarto tra le medie di L ₃
P	Potenza del test che si vuole mantenere durante lo screening
S	Deviazione std della quota L ₃
α	Significatività del test

Alcuni dei fattori sono già stati decisi precedentemente ma nel caso dei primi tre in tabella sono necessarie alcune precisazioni.

Per quanto riguarda la variabile k, il numero di fattori coincide con il numero di parametri d'iniezione, già analizzati nella Sezione 3.1.

Nel paragrafo in questione si specifica la presenza di 5 parametri.

Il numero di *Corner points* è deciso in base al tipo di piano sperimentale utilizzato nello screening.

Si utilizzerà un piano fattoriale a due livelli (com'è usuale per uno screening dei dati); più precisamente, verrà progettato un piano *splits-plot* caratterizzato da N°2 HTC factors e 2^{k-1} esperimenti.

Tale piano di natura complessa e la scelta che ha portato a sceglierlo, verranno esposti nella Sezione 5.2.

Per questo test basti sapere che tale piano non necessita di *center points*, che quindi non verranno utilizzati.

Essendo inoltre che la variabile di potenziale disturbo denominata *spurgo* (Paragrafo 4.2.3) è risultata non decisiva, non verranno applicati blocchi aggiuntivi.

In Tabella 4.2.5 si riportano i dati relativi al test di potenza in questione.

Tabella 4.2.5: Dati del test di potenza

Variabile	Valore
k	5
<i>Corner points</i>	16
<i>Center points</i>	0
d	0,031
P	0,8
S	0,0168
α	0,05

In Figura 4.2.9 il risultato grafico del test di Potenza per i valori descritti. Il grafico in Figura 4.2.9 indica che al netto dei valori introdotti, basteranno $n = 2$ repliche durante lo screening per mantenere una potenza $P = 0,8$. Ripetendo il test per potenze più elevate il risultato è il medesimo; tale risultato si poteva già prevedere dal valore chiave del rapporto $\frac{\sigma_{L3}}{d}$ che è prossimo all'unità.

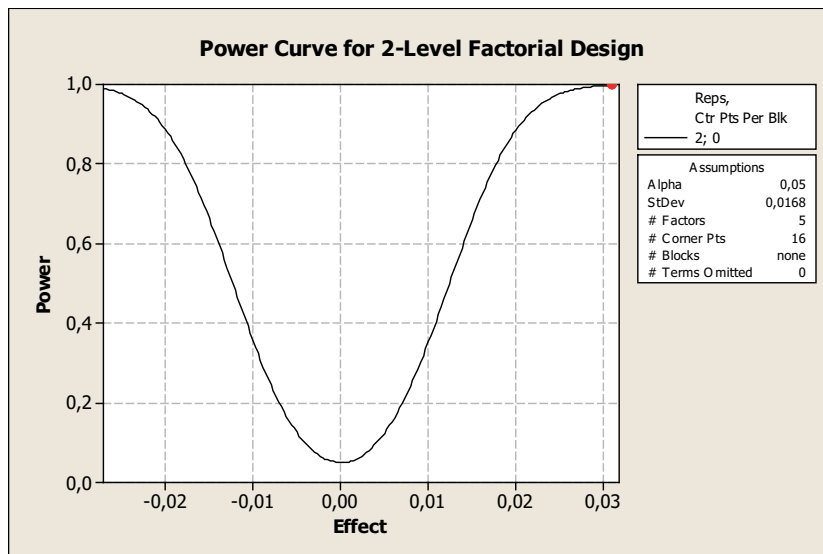


Figura 4.2.9: Risultato grafico del test di Potenza

5 | L'ESPERIMENTO DI SCREENING

In questo capitolo viene descritta la totalità delle operazioni inerenti allo sviluppo ed all'esecuzione dell'esperimento principale di questa trattazione.

Gli obiettivi di questo esperimento sono comprendere quali parametri modificabili risultano indispensabili all'ottimizzazione dell'iniezione dell'articolo campione e, tramite opportune analisi dei dati raccolti, individuare quale strada intraprendere per migliorare il processo.

Queste analisi, che vengono eseguite sulle risposte significative e a partire dai soli parametri significativi, si prefiggono di individuare le aree di esistenza della conformità del modello in cera.

Una volta che tale area è stata modellata, è possibile scorrerla tramite un algoritmo di ottimizzazione al fine di individuare il punto di funzionamento più congeniale al processo Microcast.

L'esperimento è stato svolto su di un unico stampo selezionato strategicamente in modo da descrivere nei particolari tutti i passaggi effettuati (caratteristiche dello stampo e del pezzo, scelta del piano sperimentale, selezione delle caratteristiche misurate ed analizzate, ciclo di misura, etc.).

Tale iter può essere svolto su qualsiasi stampo Microcast poiché nei capitoli precedenti sono stati resi univoci tutti i parametri misurabili e modificabili.

Come detto precedentemente, i parametri misurabili descritti nella Sezione 3.2 non verranno utilizzati in queste analisi poiché non esiste un database tale da mostrare le differenze tra i vari stampi.

Tali variabili saranno necessarie in un momento successivo a questa trattazione, quando e se si vorrà espandere questo progetto in modo da migliorare in blocco tutta la fase di iniezione.

5.1 DESCRIZIONE DELL'ITEM SELEZIONATO

Lo stampo selezionato per la fase principale di sperimentazione è denominato 2577: esso contiene un unico item (2577-00) riprodotto in N°8 impronte, collegate ad un corpo centrale che funge da canale di alimentazione sia per la fase di iniezione della cera che per la fase di fonderia.

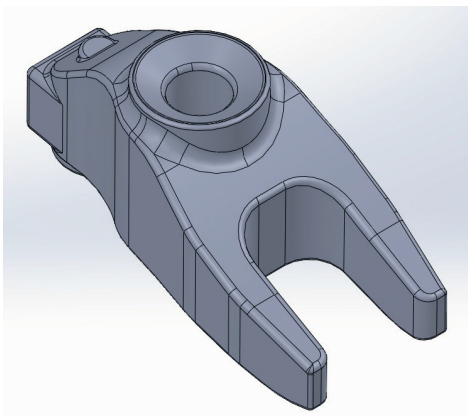
Tale corpo centrale è a tutti gli effetti il runner che viene incollato al pattern principale in fase di montaggio del grappolo.

In Figura 5.1.1 si possono osservare le geometrie del singolo item e del corpo totale, così come fuoriesce dallo stampo dopo l'iniezione.

Per semplicità, d'ora in poi il corpo completo delle otto impronte sarà definito come *mod.2577*, dato che rappresenta il modello in cera che si andrà ad analizzare successivamente.

Sono stati appositamente creati dei disegni tecnici di massima, contenenti gli ingombri e le quote principali dell'item 2577-00 e di *mod.2577*.

Tali disegni sono consultabili per informazione in Appendice C.



(a) Il singolo item 2577-00



(b) Il corpo totale *mod.2577*, che comprende N°8 impronte dell'item 2577-00

Figura 5.1.1: Immagini relative al codice stampo 2577

Questa modalità di progettazione degli stampi è molto utilizzata nel caso in cui i volumi di produzione siano elevati. Iniettare un corpo unico che contiene già varie impronte consente di diminuire le tempistiche di incollaggio dei modelli al grappolo ma soprattutto riduce sensibilmente il tempo totale di iniezione.

Di contro, i costi e i tempi di industrializzazione e costruzione dello stampo aumentano; è perciò importante specificare che solo volumi di produzione molto alti giustificano uno stampo di questo tipo.

Nel caso in esame, si parla di una produzione massiccia (circa 250.000 pezzi/anno) che occupa una pressa per l'iniezione quasi per la totalità del tempo utile alla produzione.

2577-00 è l'item più prodotto in azienda ed è il #1 della graduatoria processata nella Sezione 4.1. Per questo motivo e anche a causa della sua importanza a livello di costi/ricavi si è deciso di analizzarlo approfonditamente e prima di ogni altro codice.

L'articolo in questione è un particolare prodotto per un'azienda automotiva ma per questioni legate alla privacy aziendale e alle normative vigenti non verranno citate né la funzione di questo item né l'azienda per cui viene prodotto.

Per i fini preposti è però importante definire l'importanza di alcune parti di questo prodotto.

Affinché il prodotto finale sia conforme, oltre all'integrità del particolare e al rispetto delle indicazioni di tolleranza, è necessario che le superfici a contatto con altri particolari meccanici siano prive di difetti.

Tali superfici (evidenziate in Figura 5.1.2), sono attentamente controllate visivamente dopo l'iniezione dei modelli e successivamente durante l'esame visivo subito a monte della spedizione dei particolari.

La presenza di difetti in positivo o in negativo su tali superfici a livello della fase di iniezione comporta lo scarto immediato dell'intero mod.2577. Questa particolarità deve essere necessariamente compresa nell'analisi di conformità visiva del modello.

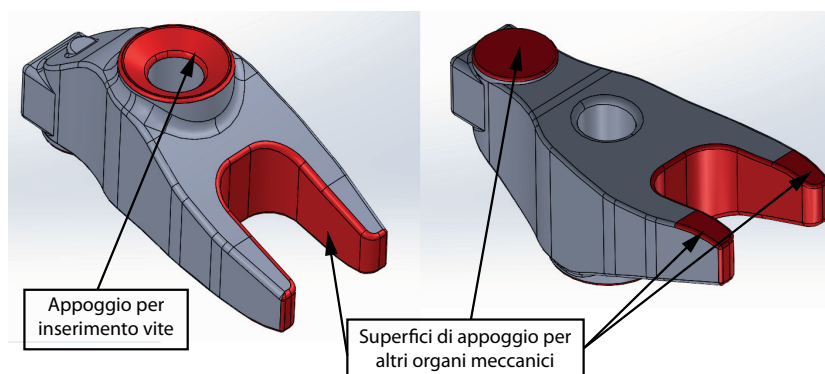


Figura 5.1.2: Superfici di controllo di 2577-00

Oltre alla conformità visiva, durante tutto il processo è importante mantenere in controllo costante la quota f evidenziata in Figura 5.1.3.

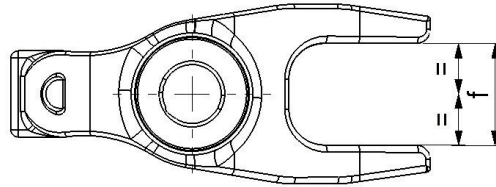


Figura 5.1.3: Quota di controllo larghezza forcella

Tale dimensione è fortemente variabile a causa della geometria della forcella: i ritiri consecutivi durante il processo (cera, guscio ceramico, lega metallica) fanno sì che vi siano delle deformazioni che aprono o chiudono la forcella.

A valle della fase di fonderia, i pezzi vengono controllati ed eventualmente raddrizzati, al fine di riportare in tolleranza la dimensione.

Un altro aspetto da sottolineare riguardante la conformità di mod.2577 è la modalità di posizionamento del corpo dopo la fase di iniezione.

Come riportato più volte in questa trattazione, una volta estratti dallo stampo, i modelli vengono posizionati su appositi pianali per concludere il raffreddamento.

La modalità di posizionamento varia da codice a codice in funzione della geometria, cercando di limitare il più possibile l'insorgere di deformazioni.

Come descritto nel Paragrafo 3.2.1, tali deformazioni sono molto comuni e costituiscono un problema per moltissimi codici prodotti.

In particolare, il mod.2577 viene posizionato come in Figura 5.1.4 all'interno di cassette facilmente trasportabili e in cui possono essere appoggiati N°80 modelli alla volta.

Si facilita così la gestione e il trasporto dei modelli; inoltre si minimizza lo spazio occupato dal singolo modello all'interno della cassetta. E' anche vero che tale posizionamento porta ad una deformazione per gravità dei corpi secondari (pezzo + attacco di colata) verso il basso.

Ovviamente, più la cera è calda al momento dell'estrazione, più la flessione dei corpi secondari è accentuata.



Figura 5.1.4: Modalità di posizionamento dopo iniezione di mod. 2577

5.2 DESCRIZIONE DEL PIANO SPERIMENTALE

5.2.1 Selezione del piano sperimentale

La selezione di un piano sperimentale appropriato è un passaggio fondamentale al fine di caratterizzare il processo.

Esiste una vasta gamma di piani utilizzabili e moltissime tecniche statistiche per analizzarli: per selezionare il piano più adatto è necessario considerare diverse variabili, tra cui alcune delle più importanti sono:

- # parametri modificabili
- Livello di precisione richiesta nei risultati
- Livello di potenza del test richiesta
- Budget e tempo disponibili per la sperimentazione
- Presenza di limiti alla sperimentazione

Come riportato nella Sezione [3.1.4](#) i parametri da gestire sono cinque. Almeno inizialmente, ogni parametro deve essere considerato di uguale importanza ed è necessario non tralasciare il fatto che potrebbero esistere delle interazioni significative tra i vari parametri.

Si sta parlando di un esperimento che principalmente vuole esplorare la significatività dei parametri in gioco e che quindi non mira a costruire un modello preciso dell'andamento delle risposte in tutto il campo di esistenza dei parametri in ingresso.

Grazie a questo esperimento è però possibile costruire dei modelli di regressione validi per lo meno nello spazio sperimentale, definito dagli estremi utilizzati per le variabili d'ingresso.

Come preannunciato nel Paragrafo 4.2.4, riguardante il calcolo della potenza dell'esperimento, queste considerazioni portano a scegliere un esperimento con piano fattoriale a due livelli.

Questi piani possono essere progettati ed analizzati facilmente tramite appositi software (in questa trattazione viene utilizzato Minitab 16©) e possono essere frazionati per minimizzare il numero di esperimenti senza però diminuire la potenza del test ANOVA.

Si specifica che la progettazione dell'esperimento e i test che ne derivano seguono i concetti teorici inerenti alle tecniche di Design Of Experiment (DOE), consultabili nel dettaglio in [5].

Nel caso di un comune piano fattoriale a due livelli senza uso di punti centrali, si elencano nella seguente tabella il numero di esperimenti da effettuare e la risoluzione al variare del livello di frazionamento utilizzato:

Piano	Corner points	Risoluzione
2^k	32	Full
2^{k-1}	16	V
2^{k-2}	8	III

Il problema principale inerente a questo gruppo di fattori deriva dalla difficoltà nel variare velocemente due di questi (T_1 e T_2).

Come è stato riportato nel Paragrafo 3.1.1, la variazione di questi due parametri comporta una lunga attesa. Ciò significa che un piano con casualizzazione completa porterebbe a dover aspettare 20 – 30 minuti dopo ogni singolo trattamento.

Ciò porterebbe ad un eccessivo utilizzo del tempo dedicato all'esperimento e ne risentirebbe la produzione. E' inoltre possibile che, attendendo così tanto tra un trattamento e l'altro, intervengano fattori di disturbo legati al fermo macchina (inattività impianto, intasamento tubazioni, eccessivo raffreddamento delle piastre, etc.) che potrebbero aggiungersi alla variabilità del processo.

Non essendo quindi possibile utilizzare un piano totalmente casualizzato è necessario ragionare su piani più complessi e meno utilizzati.

Siccome questo problema è piuttosto comune nel campo del DOE, sono stati appositamente progettati dei piani che gestiscono al meglio queste situazioni.

Questo tipo di variabili sono chiamate comunemente fattori Hard To Change (HTC) e i piani in questione sono detti *Split-plot* oppure *Piani a lotti suddivisi*.

I piani Split-plot forniscono una casualizzazione ridotta degli esperimenti, dividendo il piano in lotti principali in cui gli HTC rimangono invariati. In ogni lotto principale, detto anche Whole Plot (WP), vengono eseguiti gli esperimenti relativi ad un singolo livello del fattore HTC in modo da ridurre i tempi di sperimentazione.

Ad ogni Whole plot è associato un identico lotto parziale (Sub Plot (SP)), in cui i restanti Easy To Change (ETC) sono eseguiti in modo casuale.

E' possibile progettare un piano Split-plot anche per più di un fattore HTC. Nel caso in questione è necessario elaborare un piano sperimentale caratterizzato da due HTC, in modo da modificare le due temperature un numero minore di volte rispetto ad un piano completamente casualizzato.

ETC	2 HTC Factors					
	4 WP			8 WP		16 WP
	1/4	1/2	Full	1/4	1/2	1/4
1			2 SP Full			
2			4 SP Full			
3		4 SP V	8 SP Full		4 SP Full WP + 3FI	
4	4 SP IV	8 SP VI	16 SP Full	4 SP IV WP + 2FI	8 SP Full WP + 4FI	4 SP Full WP + 2FI
5	8 SP IV	16 SP VII	32 SP Full	8 SP V WP + 3FI	16 SP Full WP + 5FI	8 SP Full WP + 3FI

Figura 5.2.1: I design Split-plot proposti da Minitab 16©

Mantenendo queste caratteristiche, Minitab propone dei design di realizzazione del piano tra cui scegliere. In funzione del frazionamento (e quindi del numero di esperimenti). Tali opzioni, completate dalle caratteristiche principali, sono riportate in Figura 5.2.1.

Per ogni possibilità sono riportati il numero di esperimenti per SP, la risoluzione del piano sperimentale e, dove possibile, il più basso livello di

interazione (es: 3FI = 3-factors interaction) che viene confuso con l'errore su WP.

Si è deciso di effettuare l'esperimento con il numero minimo di lotti principali, così da minimizzare il tempo necessario per l'esperimento. Nello stesso tempo si è cercato però di limitare l'effetto di confounding alle sole interazioni elevate.

Naturalmente, più il piano viene frazionato, più la risoluzione diminuisce, non distinguendo più gli effetti delle interazioni di livello più alto.

Visto che non si è ancora a conoscenza dell'importanza intrinseca delle interazioni all'interno della sperimentazione, si tende ad un comportamento conservativo, cercando di mantenere una risoluzione alta senza però ricadere nel piano completo.

Nel Paragrafo 4.2.4 è stato dimostrato che sono necessarie due repliche per ottenere una potenza del test di $P = 0,8$; il piano sarà quindi replicato due volte, portando così al doppio degli esperimenti e naturalmente al doppio dei blocchi principali.

E' inoltre da notare che il software non propone l'utilizzo di *punti centrali*, poiché i piani Split-plot non gestiscono le operazioni ad essi collegate.

Poste tali condizioni, la scelta è ricaduta sul piano la cui cella è evidenziata in Blu in Figura 5.2.1, di cui si elencano le caratteristiche in Tabella 5.2.1.

Tabella 5.2.1: Caratteristiche del piano di sperimentazione selezionato

Caratteristica	Simbolo	Valore
Fattori totali	k	5
Hard To Change factors	HTC	2
Easy To Change factors	ETC	3
Whole plots	WP	4
Risoluzione piano	R	V
Corner points per replica	cp	$2^{k-1} = 16$
Center points	cP	0
Repliche	n	2
Esperimenti totali	N	$2 \cdot 2^{k-1} = 32$

La struttura di tale piano (senza considerare la casualizzazione degli esperimenti) è schematizzata in Figura 5.2.3 mentre lo schema relativo alla struttura degli alias può essere consultato in Figura 5.2.2.

Alias Structure

$I + T_1[HTC]*T_2[HTC]*p*q*t_{tot}$
 $T_1[HTC] + T_2[HTC]*p*q*t_{tot}$
 $T_2[HTC] + T_1[HTC]*p*q*t_{tot}$
 $T_1[HTC]*T_2[HTC] + p*q*t_{tot}$
 $p + T_1[HTC]*T_2[HTC]*q*t_{tot}$
 $q + T_1[HTC]*T_2[HTC]*p*t_{tot}$
 $t_{tot} + T_1[HTC]*T_2[HTC]*p*q$
 $T_1[HTC]*p + T_2[HTC]*q*t_{tot}$
 $T_1[HTC]*q + T_2[HTC]*p*t_{tot}$
 $T_1[HTC]*t_{tot} + T_2[HTC]*p*q$
 $T_2[HTC]*p + T_1[HTC]*q*t_{tot}$
 $T_2[HTC]*q + T_1[HTC]*p*t_{tot}$
 $T_2[HTC]*t_{tot} + T_1[HTC]*p*q$
 $p*q + T_1[HTC]*T_2[HTC]*t_{tot}$
 $p*t_{tot} + T_1[HTC]*T_2[HTC]*q$
 $q*t_{tot} + T_1[HTC]*T_2[HTC]*p$

Figura 5.2.2: Schematizzazione dell' Alias structure del piano progettato

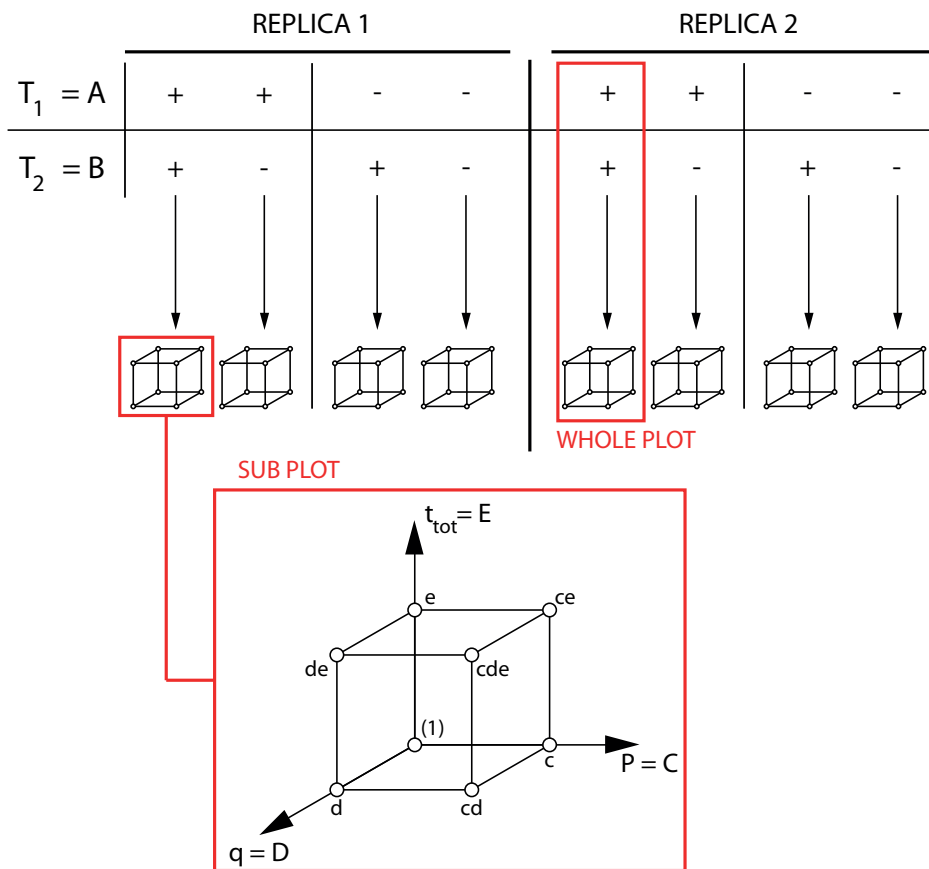


Figura 5.2.3: Schematizzazione del piano di sperimentazione utilizzato non casualizzato

5.2.2 I livelli dei parametri

La selezione dei livelli dei fattori è un passaggio fondamentale per la buona riuscita di un esperimento.

Nell'esperimento in questione è ancora più importante poiché esistono solo due livelli per fattore, corrispondenti quindi con gli estremi del campo analizzato.

Un campo di esistenza troppo piccolo potrebbe portare a test falsi negativi (effetti non significativi), escludendo così dei fattori che invece potrebbero essere importanti.

Al contrario, se si sceglissero degli estremi troppo lontani tra loro, i risultati potrebbero non considerare le variazioni della risposta all'interno del campo. Tale problema è solitamente gestito tramite l'utilizzo dei punti centrali ma, come si è già detto, in questo esperimento non possono essere considerati.

Si tratta in ogni caso di un esperimento di screening dei fattori: ciò significa anche che non si è a conoscenza di eventuali modelli inerenti allo spazio di conformità in funzione dei parametri di processo.

La selezione degli estremi non può essere quindi un procedimento certo. Si tratta di sfruttare l'esperienza delle persone che osservano tale processo ogni giorno e cercare di trarne dei dati utili per la sperimentazione.

Detto ciò, si è creato un iter per la selezione dei livelli di ogni parametro, seguito poi per tutte le variabili modificabili dell'esperimento. Viene qui riportato:

- Considerazione dei limiti imposti dal fornitore della cera e/o dal fornitore delle presse
- Intervista al responsabile degli operatori di reparto al fine di comprendere la variabilità della conformità generale della cera in relazione al parametro d'interesse
- Confronto con l'ente *Ufficio Tecnico* per determinare un range di utilizzo del parametro
- Costruzione degli estremi nell'intorno del valore standard del parametro (utilizzo in produzione)
- Controllo degli estremi tramite un esperimento ad "una variabile alla volta"

Utilizzando tale iter sono stati ricavati i livelli desiderati: in Tabella [5.2.2](#) vengono riportati i valori standard utilizzati solitamente in produzione ed i valori selezionati per la sperimentazione.

Tabella 5.2.2: Valori dei parametri modificabili considerati per l'esperimento di screening a confronto con lo standard

	T_1 [°C]	T_2 [°C]	P [bar]	q [cc/s]	t_{tot} [s]
Valori standard	60	22	20	50	40
Livelli esperimento	58	21	20	40	30
	62	23	40	80	50

5.3 LE VARIABILI DI RISPOSTA

5.3.1 Rapporto tra parametri d'iniezione e risposte

Per studiare l'effetto dei parametri d'iniezione sulla conformità della cera è necessario affidarsi all'analisi di caratteristiche misurabili direttamente sul modello.

Ogni caratteristica misurata deve essere indice di uno o più aspetti critici del particolare; in generale, tali aspetti corrispondono con le difettologie descritte nella Sezione 3.2, ma com'è naturale, ogni item è caratterizzato da una propria morfologia, rendendolo oggetto solamente di alcune degli aspetti descritti.

Ad esempio, un particolare massivo e tozzo sarà soggetto a linee di flusso e avvallamenti ma non saranno decisive le deformazioni per errato posizionamento o le incompletezze.

Ogni item avrà quindi delle caratteristiche misurabili che intercettano gli aspetti più critici del modello in cera associato.

Per via della natura del processo di iniezione, queste caratteristiche possono essere:

- caratteristiche dimensionali
- caratteristiche visive

Le caratteristiche dimensionali sono associate soprattutto alla conformità dimensionale del modello, ma in alcuni casi una dimensione può essere indice di altre tipologie di difetto.

Un esempio di questa affermazione è individuare una misura di planarità su una superficie ampia come indice dell'avvallamento o del rigonfiamento associato.

Al contrario, le caratteristiche visive sono associate solamente a difettologie di tipo visivo.

Nel caso siano prese in considerazione caratteristiche di questo tipo, va appositamente creata una scala che divide in livelli la criticità del difetto sul modello in esame. Tale scala valuta inoltre a che livello il difetto porta ad una non conformità generale del modello.

E' importante specificare che un difetto che può apparire identico per dimensione e aspetto può essere valutato diversamente se appare su due modelli di item diversi o addirittura su due superfici differenti dello stesso modello.

E' importante infatti valutare ogni difetto in relazione con l'item in esame, le sue peculiarità e le richieste del cliente.

Se ad esempio l'iniezione porta ad avere evidenti bolle d'aria sull'attacco di colata del particolare, il pezzo potrà essere giudicato conforme perché la colata verrà successivamente eliminata. Al contrario, se è presente una bolla (anche di entità minima) su una superficie estetica, il modello deve essere ritenuto non conforme.

Una volta individuate e misurate a fine esperimento, le caratteristiche valutate devono essere messe a confronto con la realtà produttiva, giudicata conforme per definizione, poiché già ritenuta soddisfacente dal cliente.

A fronte di questa affermazione, vengono iniettati e successivamente valutati anche alcuni modelli ottenuti utilizzando i parametri standard.

Le medie derivate dalle misure su questi campioni va a comporre un gruppo di valori che sta alla base delle valutazioni della conformità dei modelli ottenuti in sperimentazione.

5.3.2 Risposte considerate per mod.2577

Il modello in cera soggetto dell'esperimento di screening è caratterizzato da una geometria complessa e, come detto nella Sezione 5.1, questi presenta delle superfici che devono forzatamente essere esenti da difetti superficiali.

Essendo il corpo in uscita dallo stampo la composizione di N°8 particolari più il runner che li collega al corpo principale del pattern, si applicano apposite condizioni di conformità.

Al fine di caratterizzare sia dimensionalmente che visivamente il modello, sono state selezionate risposte facenti parte di entrambi i gruppi precedentemente descritti.

In Tabella 5.3.1 vengono elencate tutte le variabili di risposta rilevate a valle dell'esperimento di screening. Esse vengono discusse in questo paragrafo; si specifica anche quale difetto vanno a valutare.

Tabella 5.3.1: Risposte rilevate per la caratterizzazione di mod.2577

Risposta	Tipologia	Difetto valutato
bb1	Dimensionale	Anomalie dimensionali lineari
bb2	Dimensionale	Anomalie dimensionali lineari
m1	Dimensionale	Deformazione per errato posizionamento
m2	Dimensionale	Deformazione per errato posizionamento
f1	Dimensionale	Anomalie dimensionali lineari
f2	Dimensionale	Anomalie dimensionali lineari
α	Dimensionale	Deformazione per errato posizionamento
v_b	Visivo	Bolle d'aria
v_{lf}	Visivo	Linee di flusso

L'ordine di misura di tutte le caratteristiche segnalate è totalmente casuale e differente dall'ordine sperimentale (Run Order): ciò minimizza la possibilità di creare una correlazione tra le due fasi della sperimentazione.

Si descrivono innanzi tutto le caratteristiche dimensionali: al fine di raggiungere la massima precisione consentita, tutte le risposte di tipo dimensionale tranne M (misurata tramite una bilancia di precisione) sono state raccolte tramite la macchina Coordinate Measuring Machine (CMM) di proprietà dell'azienda.

In Figura 5.3.1 sono visualizzate le varie caratteristiche dimensionali le cui misure sono state raccolte tramite CMM.

Vista la quantità di dimensioni da rilevare su un numero elevato di modelli, si è deciso di creare un apposito ciclo di misura per CMM, in modo da minimizzare le tempistiche e allo stesso tempo massimizzare la ripetibilità della misurazione.

La routine di misura viene descritta dettagliatamente in Appendice D.1.

Entrando nello specifico delle varie risposte dimensionali rilevate, ognuna di esse valuta un aspetto della conformità del modello.

Le variabili bb1 e bb2

Come si può notare in Figura 5.3.1, le variabili bb1 e bb2 valutano la distanza tra i fori di due particolari diversi: tali dimensioni non sono

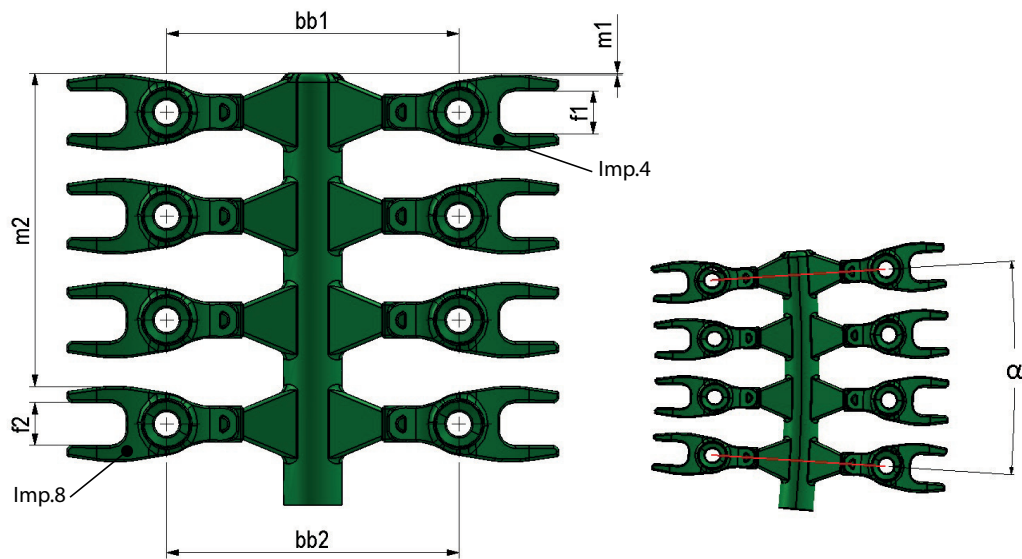


Figura 5.3.1: Schema delle caratteristiche dimensionali rilevate

importanti al fine di avere un pezzo conforme a fine processo ma sono interessanti per la valutazione del ritiro della cera in fase di iniezione.

I fori oggetti della misura sono realizzati tramite delle spine verticali nello stampo: esse bloccano il ritiro della cera in fase di raffreddamento, differenziandone il valore dal resto del modello.

Questa variabile non ha importanza a livello di grezzo di fusione; d'altra parte, essa valuta una caratteristica dimensionale di grande importanza per quanto riguarda il controllo del prodotto finale.

Uno scostamento anche importante dallo standard non porterebbe a grandi problemi di fattibilità ma sarebbe necessario una serie di controlli dimensionali su altre quote inerenti al pezzo a valle dell'intero processo.

Le variabili m1, m2 e alpha

Ipotizzando che non si possa variare il posizionamento del modello a valle della fase di iniezione, le variabili m1 e m2 valutano la deformazione della cera a causa della forza di gravità. Per questo motivo tutto il corpo secondario (pezzo + attacco di colata) tenderà a flettersi verso il basso fino a completo raffreddamento.

Sono state perciò rilevate le dimensioni relative a queste flessioni per due delle otto impronte del modello. Sono state selezionate le impronte Imp.4

e Imp.8 poiché sono la prima e l'ultima ad essere riempite dal materiale in entrata e quindi le due risposte potrebbero avere comportamenti differenti.

E' stato inoltre rilevato l'angolo α : tale dimensione si occupa di valutare la flessione del corpo principale del modello (runner centrale) sotto l'effetto della forza di gravità.

Il fenomeno deformativo in questione non è fondamentale per il rispetto delle specifiche dimensionali richieste dal cliente ma è comunque utile tenerlo sotto controllo accurato in modo che non vi siano forti modificazioni a livello di geometria del modello.

Se i corpi secondari si piegassero troppo verso il basso, lo spazio tra uno e l'altro diminuirebbe, portando a potenziali problemi: se m2 aumentasse troppo e lo spazio tra i vari corpi secondari diminuisse, le pareti di refrattario che vanno a essiccarsi durante la formatura del guscio ceramico si assottiglierebbero.

Ciò porterebbe a buone probabilità di rottura del guscio ceramico sotto l'azione della pressione metallostatica durante la colata.

Lo stesso discorso vale anche per la variabile α : se il corpo principale si deformasse in modo eccessivo dopo l'iniezione della cera (come nella parte di destra di Figura 5.3.1), lo spazio tra i corpi secondari diminuirebbe da uno dei due lati e le conseguenze potrebbero essere disastrose.

Le variabili f1 e f2

Le variabili f1 e f2 si interessano della dimensione f definita in Figura 5.1.3. A causa della sua importanza questa deve essere mantenuta in completo controllo durante il processo.

E' perciò fondamentale che i valori di queste dimensioni siano comprese nell'analisi.

Si è deciso di rilevare tali dimensioni sulle impronte Imp.4 e Imp.8 per lo stesso motivo descritto per le variabili m1 e m2.

Tali risposte sono teoricamente le variabili dimensionali più importanti e critiche dell'analisi: durante tutto il processo, la quota f è tenuta sotto stretto controllo e alcuni particolari vengono scartati proprio per la non conformità di questa dimensione.

Per quanto riguarda la parte più esterna della forcilla, la dimensione può essere modificata tramite una raddrizzatura del grezzo di fusione; al contrario, per la radice della forcilla è importante che la dimensione non si discosti dalle previsioni o i pezzi risultanti si tradurranno in scarti.

E' per questo motivo che nel ciclo di misura descritto in [D.1](#) viene specificato che la quota è stata rilevata nei pressi della radice della forcella.

Le variabili visive (v_b e v_{lf})

Per quanto riguarda l'aspetto visivo dei modelli, le caratteristiche critiche da tenere sotto controllo sono la presenza di segni da bolle di gas sotto pelle e di linee di flusso visibili.

Tali difettologie sono state descritte nella Sezione [3.2](#).

Sono state selezionate queste due caratteristiche poiché sono quelle che più minano la conformità visiva del modello. Eseguendo delle prove di scostamento dallo standard di iniezione si è subito notata la manifestazione di queste difettologie, misurabili prettamente in modo visivo.

A tale riguardo sono state create delle apposite scale di misurazione del difetto al fine di valutare se un modello può o non può essere ritenuto conforme agli standard richiesti.

Le scale ordinali, formate da immagini esemplificative dei difetti descritti, possono essere consultate in [Appendice D.2](#).

Come si può notare osservando le relative scale, per entrambe le caratteristiche esiste una differenziazione tra la presenza del difetto sul corpo centrale e la presenza sui pezzi.

Se i difetti sono presenti solamente sul runner, i particolari (e quindi il modello totale) sono ritenuti conformi, poiché la presenza di linee di flusso o bolle sul corpo che alimenta i pezzi non ha nessuna importanza a livello di fattibilità o estetico.

A differenza delle risposte di tipo dimensionale, questi difetti non sono valutati tramite confronto con i particolari standard iniettati durante la sperimentazione.

In questo caso la scala critica, creata precedentemente alla sperimentazione, è sufficiente per una valutazione della conformità del modello.

5.4 ANALISI DEI DATI

5.4.1 Selezione delle risposte da analizzare

Una volta eseguiti l'esperimento e la misurazione dei modelli come da descrizioni precedenti, è stato possibile analizzare le risposte.

E' necessario studiare immediatamente la correlazione tra le varie risposte in modo tale da valutare se esistono dei collegamenti tra di esse. Questo test è molto utile anche per valutare quali variabili è utile analizzare più approfonditamente. Si valutino i risultati del test in Figura 5.4.1.

Correlations: M; v_b; v_lf; m1; m2; bb1; bb2; f1; f2; alpha									
	M	v_b	v_lf	m1	m2	bb1	bb2	f1	f2
v_b	-0,725 0,000								
v_lf	0,480 0,005	-0,441 0,012							
m1	0,068 0,710	-0,032 0,863	-0,053 0,773						
m2	0,199 0,275	-0,363 0,041	0,040 0,829	0,461 0,008					
bb1	0,270 0,135	-0,034 0,852	0,402 0,023	-0,144 0,432	-0,291 0,106				
bb2	0,121 0,509	0,099 0,590	0,282 0,119	-0,166 0,365	-0,389 0,028	0,950 0,000			
f1	0,216 0,236	-0,049 0,791	0,392 0,027	0,078 0,672	-0,293 0,104	0,853 0,000	0,838 0,000		
f2	-0,050 0,785	0,075 0,685	0,235 0,195	0,005 0,978	-0,391 0,027	0,716 0,000	0,765 0,000	0,758 0,000	
alpha	0,312 0,082	-0,136 0,458	0,349 0,050	0,075 0,685	0,226 0,214	0,280 0,120	0,140 0,445	0,144 0,432	-0,100 0,587

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Figura 5.4.1: Analisi di correlazione tra le risposte misurate

In Figura 5.4.1 si possono subito notare le forti correlazioni tra alcune variabili.

Ci si limita a centrare l'attenzione sulle risposte misurate indipendenti e/o indispensabili all'analisi della conformità.

Si può subito notare l'esistenza di una forte correlazione tra le singole coppie di risposte simili (m1/m2 , bb1/bb2 , f1/f2): tra di esse, l'indice di correlazione è sempre significativo e viene evidenziata una proporzionalità diretta.

Di conseguenza, per questo motivo si studierà solo una variabile ogni coppia: si è scelto di mantenere tutte le risposte relative all'impronta Imp.8 (bb2, m2, f2).

Ciò è dovuto al fatto che la posizione di Imp.8 (e quindi anche le misure ad essa riferite) è meno influenzata dalla modalità di bloccaggio del modello per la misurazione su **CMM** e dall'esistenza dell'incurvamento del corpo principale, di cui è indice α .

E' importante far notare che c'è forte correlazione anche tra le risposte bb2 e f2.

Essenzialmente, ciò dipende dalla modalità di ritiro della cera nelle zone interessate: per la prima coppia di risposte, il ritiro della cera è bloccato dalle pareti dello stampo che formano la forcina e nel secondo caso sono le spine che creano la geometria del foro che bloccano il ritirarsi del materiale.

Essendo la dimensione relativa alla forcina molto più importante, si è deciso di mantenere solamente f2 nelle successive analisi.

Per quanto riguarda le risposte v_b , v_{lf} , si può notare una forte correlazione inversa tra loro. Essendo le variabili di tipo visivo fondamentali per la valutazione di mod.2577 si è deciso di analizzarle entrambe nel dettaglio.

Riassumendo le valutazioni espresse, si elencano in Tabella 5.4.1 le variabili di cui si è effettuata un'analisi approfondita.

Tabella 5.4.1: Risposte analizzate per la caratterizzazione di mod. 2577

Risposta	Tipologia	Difetto valutato
m2	Dimensionale	Deformazione per errato posizionamento
f2	Dimensionale	Anomalie dimensionali lineari
α	Dimensionale	Deformazione per errato posizionamento
v_b	Visivo	Bolle d'aria
v_{lf}	Visivo	Linee di flusso

5.4.2 Analisi delle risposte considerate

Per ognuna delle variabili di risposta riportate in Tabella 5.4.1 sono stati effettuati gli stessi passaggi, separatamente una dall'altra. Anche in questo caso tutte le analisi statistiche sono state svolte tramite il software Minitab 16©.

In ordine:

1. Definizione del DOE fattoriale del piano
2. Analisi preliminare visiva tramite factorial plots (Main effect plot, Interaction plot)
3. Esecuzione ANOVA e calcolo dei residui del modello statistico
4. Verifica dell'efficacia e del rispetto delle ipotesi ANOVA (test di Anderson/Darling, test di Bartlett, etc.)
5. Verifica dell'assenza di autocorrelazione (rispetto a ordine sperimentale e di misura)
6. Analisi dell'Effect plot e della tabella ANOVA associata

Di seguito si analizzano singolarmente tutte le risposte.

Analisi della risposta m2

Si prendono in considerazione le analisi della variabile m2 i cui grafici sono riportati in Figura 5.4.2.

Si può subito notare dai grafici degli effetti principali che il parametro t_{tot} ha un ruolo importante, così come q.

Eseguendo l'analisi del piano fattoriale (ANOVA + analisi degli effetti + calcolo dei residui) con la totalità dei parametri in gioco e le loro interazioni, vengono confermate le sensazioni portate dal main effect plot.

Si può notare dal diagramma di Lenth e dalla tabella ANOVA che sono significativi solo quattro parametri:

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
q	1	0,072715	0,072715	0,072715	11,64	0,005
t_tot	1	0,242419	0,242419	0,242419	38,79	0,000
T_1[HTC]*q	1	0,024486	0,024486	0,024486	3,92	0,071
q*t_tot	1	0,051519	0,051519	0,051519	8,24	0,014

Tutti i parametri sono legati a t_{tot} o/e a q, che come detto, parevano essere sin da subito le variabili in entrata più importanti per questo specifico fattore.

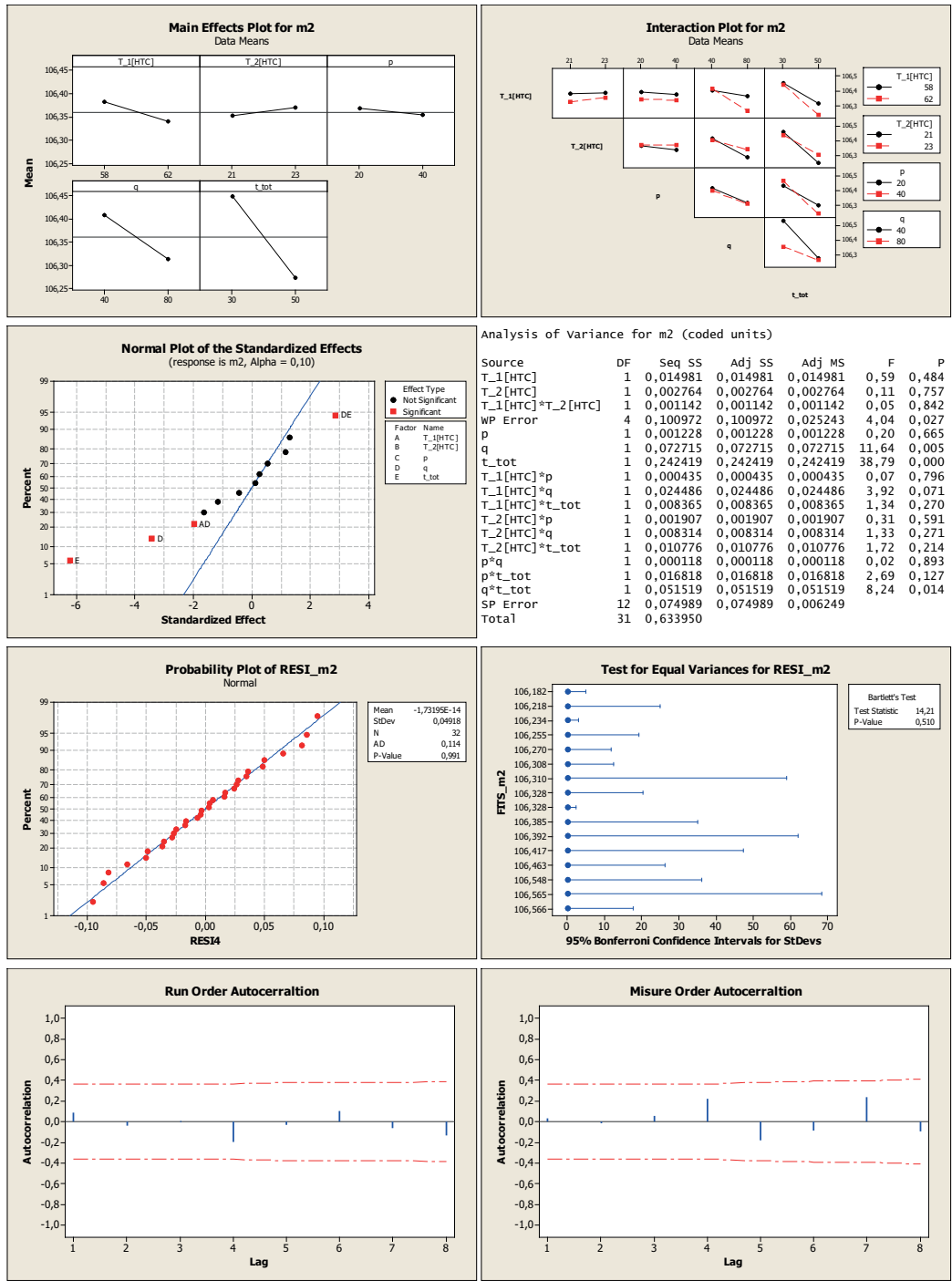


Figura 5.4.2: Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta m2

La variabile T_1 è significativa nell'interazione $T_1 \cdot q$, anche se il suo p-value è maggiore di 0,05; ciò significa che molto probabilmente, in un'analisi strutturata per una comprensione più approfondita, questa interazione non sarebbe significativa.

La verifica delle ipotesi dell'ANOVA sono soddisfatte come anche le verifiche della non presenza di autocorrelazione dei dati.

L'unico problema di questi dati è la significatività della variabile *WP error*, visibile in tabella ANOVA¹.

Questo risultato, facilmente ottenibile durante una sperimentazione *split-plot*, può portare ad una lettura inesatta o/e a confounding dato dalla non-causalizzazione.

Si è quindi riprovato ad analizzare i dati tramite un ANOVA General Linear Model utilizzando come parametri solamente t_{tot} , q e la loro interazione. Si è svolta questa analisi per comprendere se il modello risultante è sufficiente a descrivere il fenomeno e se risulta comunque soddisfatta l'integrità dell'analisi.

La tabella ANOVA risultante è:

Factor	Type	Levels	Values
q	fixed	2	40; 80
t_tot	fixed	2	30; 50

Analysis of Variance for m2, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
q	1	0,10974	0,10091	0,10091	18,11	0,000
t_tot	1	0,16544	0,15278	0,15278	27,43	0,000
q*t_tot	1	0,04217	0,04217	0,04217	7,57	0,011
Error	24	0,13369	0,13369	0,00557		
Total	27	0,45105				

S = 0,0746365 R-Sq = 70,36% R-Sq(adj) = 66,65%

Come si può vedere il modello è piuttosto soddisfacente, considerando la complessità del processo studiato: l'indice $R-sq(adj)$ è al di sopra del 50% e tutti i parametri compresi sono significativi.

Le ipotesi del modello ANOVA eseguito sono tutte soddisfatte.

Per verifica si è anche eseguita un'analisi comprendendo anche l'interazione $T_1 \cdot q$: tale parametro è risultato non significativo.

¹ Le voci *WP error* e *SP error* sono sempre presenti nelle tabelle ANOVA riguardanti sperimentazioni che utilizzano una logica *split-plot*: sulla base del modello utilizzato, esse segnalano se l'assenza di casualizzazione per i fattori HTC è significativa. Per maggiori informazioni a riguardo si consulti [5].

Si può concludere che:

$$m_2 = f(q, t_{\text{tot}}) \quad (5.4.1)$$

Analisi della risposta α

Lo studio statistico preliminare di questa variabile è riportato graficamente in Figura 5.4.3.

Nonostante grafici preliminari che evidenziano scostamenti piuttosto elevati, l'analisi del piano dimostra che nessuno dei parametri considerati è significativo per la descrizione dell'andamento di questa risposta.

I grafici restanti confermano che le ipotesi del modello sono superate completamente: si può quindi ritenere che l'analisi è completamente affidabile.

Ciò significa che l'inclinazione del corpo principale non è qualcosa che viene stimolato dalla fase d'iniezione della cera, ma è un fenomeno che si manifesta in un momento successivo.

Alla luce di questi risultati, non è quindi possibile studiare il comportamento della risposta α all'interno di questa analisi.

Analisi della risposta f_2

Osservando i grafici in Figura 5.4.4 si può affermare che anche per questa variabile il diagramma di Lenth e tabella ANOVA rispecchiano perfettamente quanto visibile nei plot preliminari.

I parametri significativi secondo ANOVA sono:

Analysis of variance for f2 (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T_1[HTC]	1	0,0100598	0,0100598	0,0100598	5,04	0,088
q	1	0,0086782	0,0086782	0,0086782	6,14	0,029
t_tot	1	0,0322436	0,0322436	0,0322436	22,81	0,000

Come è usuale per il software utilizzato, il diagramma di Lenth non comprende i parametri HTC: infatti la variabile T_1 non è visibile anche se significativa.

I grafici di verifica confermano un'analisi del piano perfettamente conforme alle ipotesi del modello.

Inoltre, in questo caso l'indice *WP error* è al di sopra del p-value di soglia: non ci sono quindi problemi riguardanti la casualizzazione.

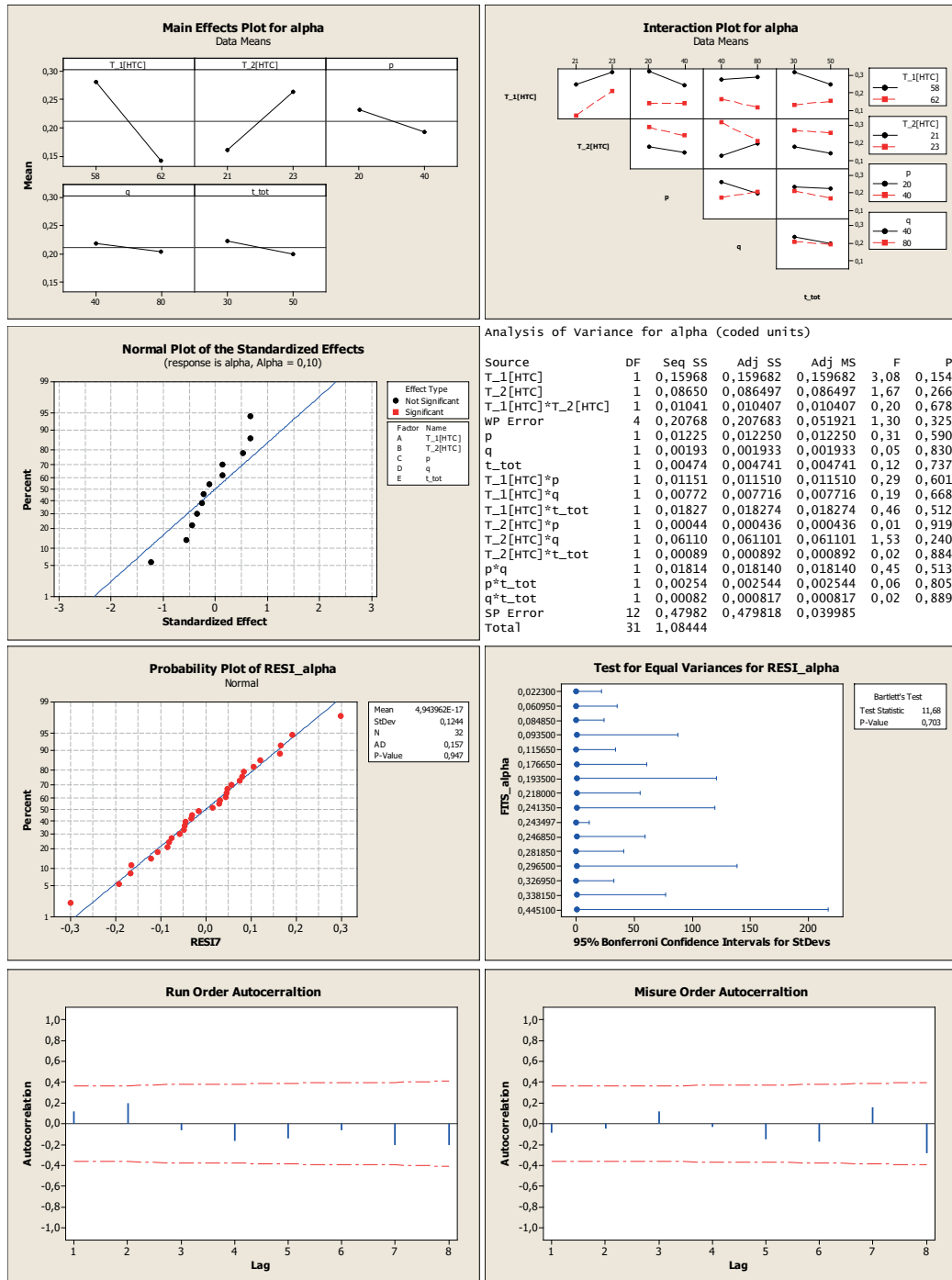


Figura 5.4.3: Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta α

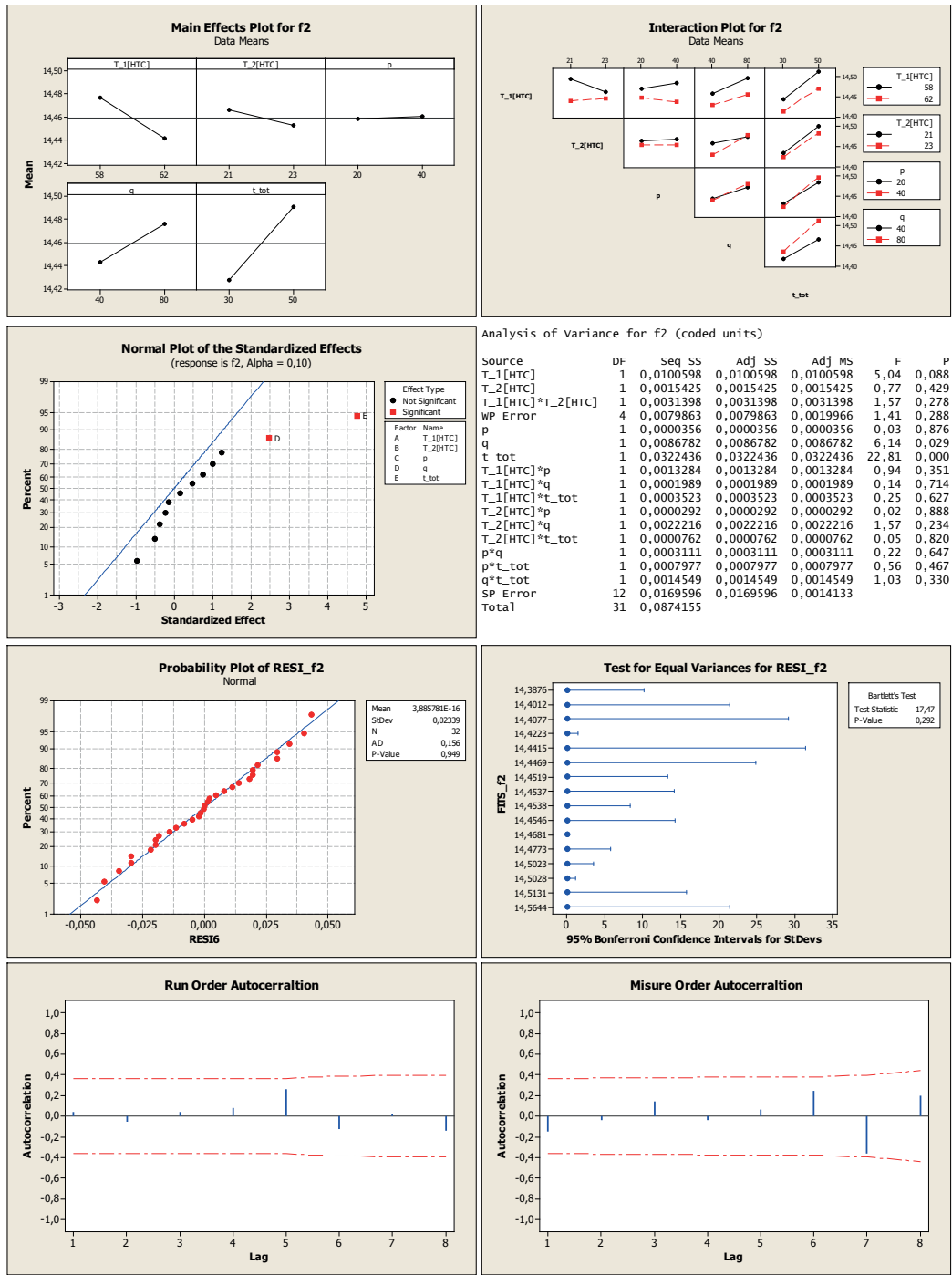


Figura 5.4.4: Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta f2

In questo caso il problema sarebbe stato da analizzare in modo più approfondito poiché uno dei fattori **HTC** è significativo come variabile principale.

Eseguendo un'ANOVA di verifica con i soli parametri significativi si ottiene:

Factor	Type	Levels	Values
T_1[HTC]	fixed	2	58; 62
q	fixed	2	40; 80
t_tot	fixed	2	30; 50

Analysis of Variance for f2, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T_1[HTC]	1	0,0054511	0,0062267	0,0062267	11,54	0,002
q	1	0,0067190	0,0054235	0,0054235	10,05	0,004
t_tot	1	0,0160733	0,0160733	0,0160733	29,80	0,000
Error	23	0,0124075	0,0124075	0,0005395		
Total	26	0,0406510				

S = 0,0232262 R-Sq = 69,48% R-Sq(adj) = 65,50%

I risultati inerenti alla completezza del modello sono simili a quelli eseguiti sulla risposta m2 e le verifiche canoniche sono in regola (anche se con problemi riguardanti la costanza della varianza sui due livelli).

Si può quindi affermare che:

$$f2 = f(T_1, q, t_{tot}) \quad (5.4.2)$$

Analisi della risposta v_b

La risposta v_b indica la presenza di bolle secondo la scala consultabile in Appendice D.2.

Essendo questo un parametro di grande importanza, durante l'esame visivo che viene svolto dopo ogni stampata di mod. 2577, tale difettologia è accuratamente valutata.

I risultati dell'analisi statistica sono consultabili in Figura 5.4.5.

La tabella ANOVA riporta i seguenti parametri significativi:

Analysis of Variance for v_b (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T_1[HTC]	1	3,7813	3,7812	3,7812	9,31	0,038
q	1	11,2812	11,2812	11,2812	72,20	0,000
T_1[HTC]*q	1	2,5313	2,5313	2,5313	16,20	0,002
T_2[HTC]*t_tot	1	0,7813	0,7813	0,7813	5,00	0,045

Per questo fattore sono fondamentali i fattori T_1 e q , ma compare anche il termine di interazione $T_2 \cdot t_{tot}$ che potrebbe complicare il modello risultante.

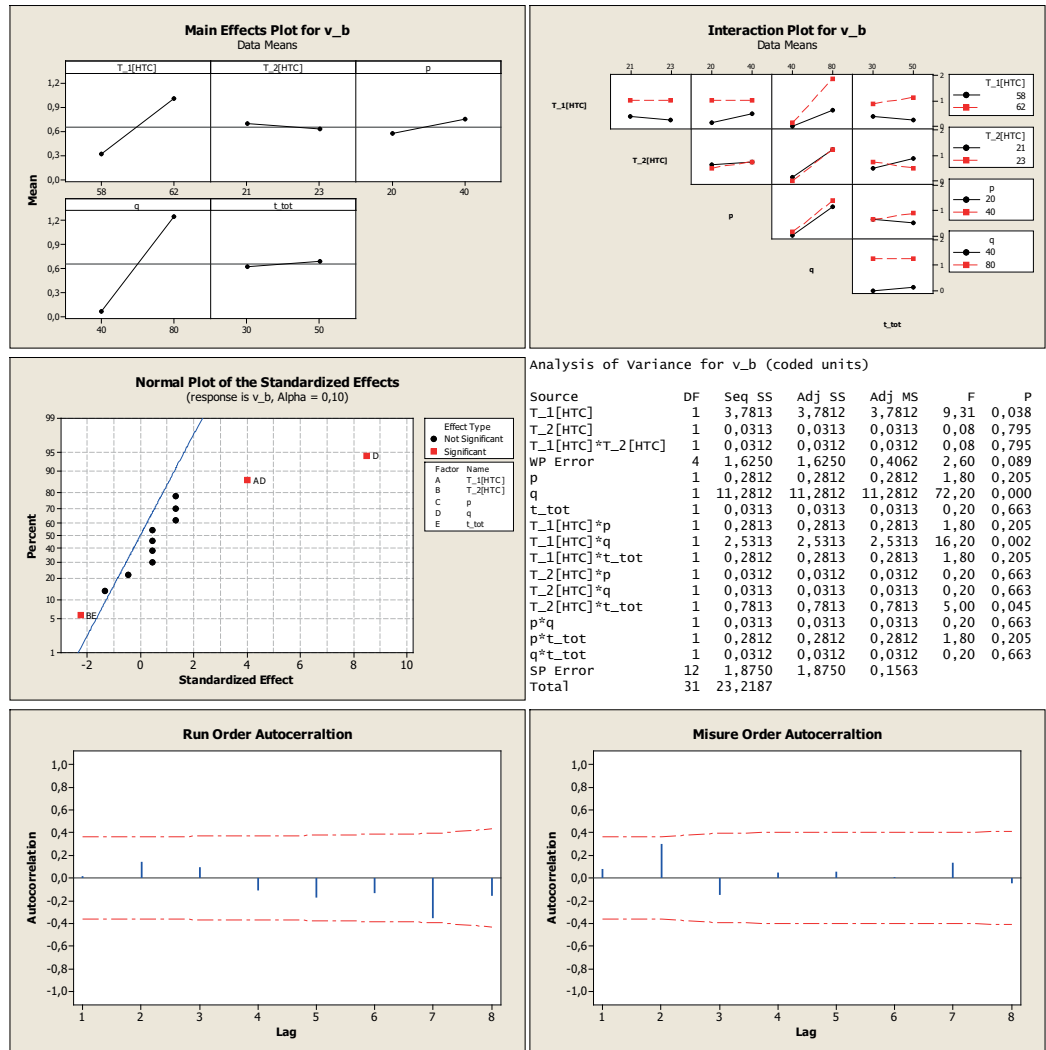


Figura 5.4.5: Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta v_b

Risposte di tipo discreto come v_b non ammettono le analisi di verifica delle ipotesi del modello in quanto la distribuzione di una variabile discreta non sarà mai gaussiana.

Vista la precisione del modello ANOVA e il livello dei residui standardizzati che ne consegue il trattamento di tali dati è comunque piuttosto affidabile.

Come verifica si è provato a trattare questi dati tramite regressione logistica ordinale, ottenendo risultati simili per quanto riguarda la significatività dei fattori.

Si è optato per una continuità del trattamento dei dati e si è perciò mantenuto il modello derivato dallo studio con ANOVA.

Provando a costruire un modello contenente soltanto le variabili T_1 e q , si sono analizzati i dati tramite ANOVA *General Linear Model* limitando l'analisi ai parametri interessati.

Eliminando alcuni outlier segnalati dal software ($|RESI| \geq 2$) ed eseguendo il test si è ottenuta la seguente tabella ANOVA:

Factor	Type	Levels	Values
T_1[HTC]	fixed	2	58; 62
q	fixed	2	40; 80

Analysis of Variance for v_b, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T_1[HTC]	1	4,6345	4,4608	4,4608	65,05	0,000
q	1	10,2249	10,6544	10,6544	155,38	0,000
T_1[HTC]*q	1	4,4608	4,4608	4,4608	65,05	0,000
Error	25	1,7143	1,7143	0,0686		
Total	28	21,0345				

S = 0,261861 R-Sq = 91,85% R-Sq(adj) = 90,87%

Anche eliminando il termine di interazione $T_2 \cdot t_{tot}$, si può notare quanto il modello si avvicini al perfetto fitting con i dati ($R\text{-sq}(\text{adj}) = 90\%$).

Si può perciò escludere il termine di interazione citato, limitando un modello descrittivo dell'andamento del fattore a:

$$v_b = f(T_1, q) \quad (5.4.3)$$

Analisi della risposta v_{lf}

La variabile di risposta in questione viene anch'essa classificata tramite una scala ordinale, consultabile in Appendice D.2.

Come v_b , anche in questo caso l'esame visivo del modello in cera passa da un'attenta valutazione di questo difetto superficiale.

La prima analisi statistica (Figura 5.4.6 segnala la significatività del solo parametro T_1):

Analysis of Variance for v_{lf} (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T_1[HTC]	1	6,1250	6,12500	6,12500	32,67	0,005

Come per la risposta v_b non è possibile svolgere le canoniche verifiche della correttezza del modello. Le valutazioni effettuate per lo studio dei dati sono le medesime.

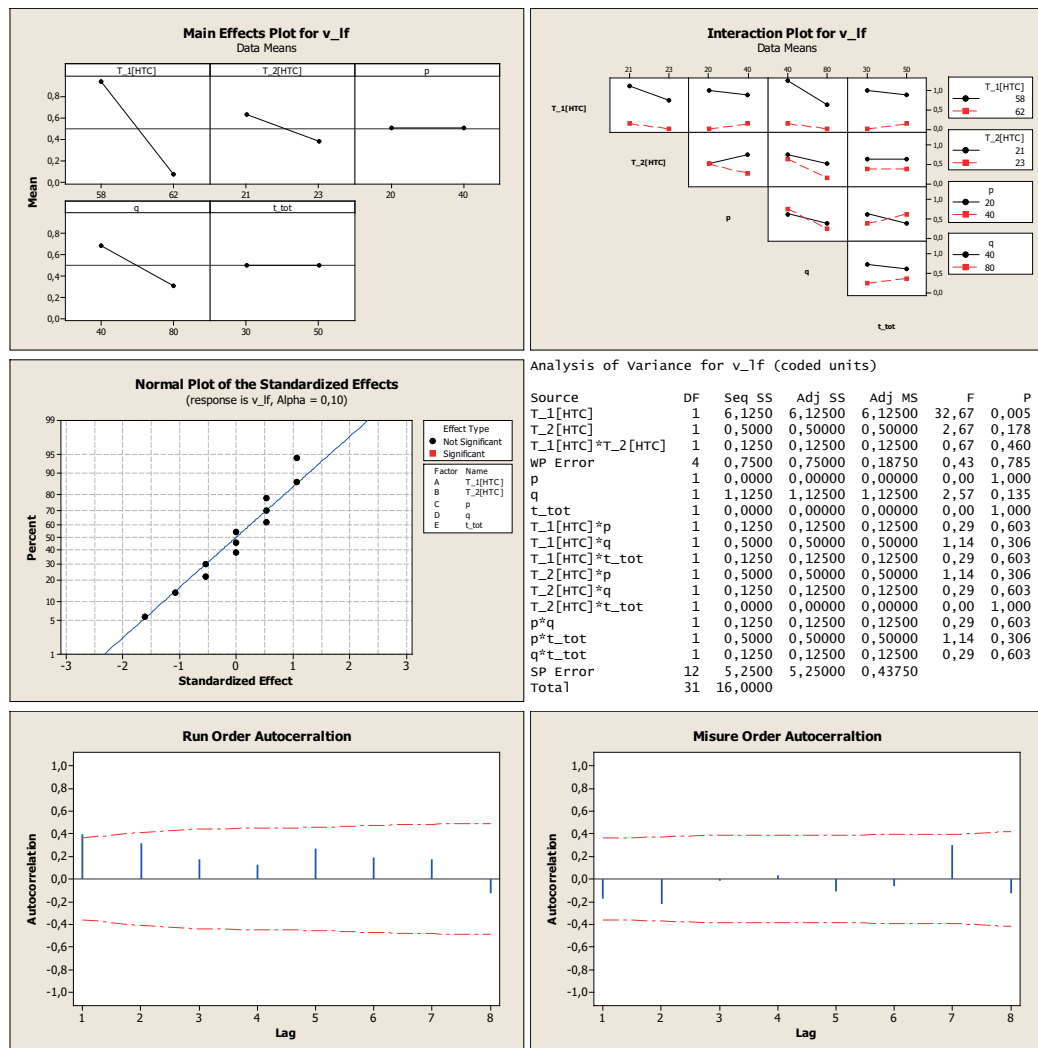


Figura 5.4.6: Grafici e tabella ANOVA inerenti alla risposta v_{lf}

Eseguendo un'analisi della varianza per un solo fattore d'interesse (One Way ANOVA) si ottengono risultati pessimi, arrivando ad un modello

poco preciso e a residui alti.

Inserendo anche il termine q , che risultava essere il secondo in importanza nell'analisi preliminare ed eliminando alcuni outlier segnalati si ottiene un modello soddisfacente:

Factor	Type	Levels	Values
T_1[HTC]	fixed	2	58; 62
q	fixed	2	40; 80

Analysis of Variance for v_{lf} , using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
T_1[HTC]	1	1,8881	1,6548	1,6548	24,15	0,000
q	1	1,1513	1,1513	1,1513	16,80	0,000
Error	23	1,5760	1,5760	0,0685		
Total	25	4,6154				

S = 0,261765 R-Sq = 65,85% R-Sq(adj) = 62,88%

Come per la risposta v_b il modello è composto dai fattori:

$$v_{lf} = f(T_1, q) \quad (5.4.4)$$

5.4.3 Definizione dei range di conformità delle variabili di risposta analizzate

A questo punto è necessario mettere a confronto le variabili analizzate con lo standard e/o creare dei modelli di raffronto per porre i limiti di conformità.

Si tratta di risolvere un semplice problema di ottimizzazione: i modelli studiati ed opportunamente elaborati indicano lo spazio in cui i parametri operano

Ciò nonostante è ancora necessario definire quali siano i contorni che indicano la conformità.

Le singole variabili devono quindi essere analizzate per comprendere le condizioni al contorno del problema di ottimizzazione.

Si prendono in considerazione solo le variabili significative studiate in modo più approfondito (m_2 , f_2 , v_b , v_{lf}) al fine di costruire i limiti di conformità desiderati.

Per quanto riguarda la variabile m_2 , è necessario fare un confronto con i modelli iniettati con parametri standard. Questi sono stati appositamente stampati e misurati per eventuali confronti in questa fase.

Sono stati calcolati la media e la deviazione standard della risposta m_2 per questi modelli:

variable	N*	Mean	StDev	Minimum	Maximum
m_2	0	106,25	0,116	106,11	106,41

Ritenendo che la totalità di questi modelli sia conforme e che la distribuzione della popolazione misurata sia di tipo gaussiano, si può affermare che la variabilità naturale di m_2 possa essere definita tramite il valore $3\sigma_{m_2}$.

$$m_{2_{max}} = \mu_{m_2} + 3\sigma_{m_2} = 106,60 \text{ [mm]} \quad (5.4.5)$$

Sotto tali ipotesi si può concedere la condizione al contorno relativa a m_2 è:

$$m_2 \leq 106,60 \text{ [mm]} \quad (5.4.6)$$

Le variabili visive hanno già un loro limite di conformità, definito in Appendice D.2: in particolare, entrambe le variabili possono essere accettate conformi se minori di 1.

Quindi, in ambito visivo, le condizioni al contorno devono essere:

$$v_b \leq 1 \quad (5.4.7)$$

$$v_{lf} \leq 1 \quad (5.4.8)$$

Caratterizzazione della quota f2

Per quanto riguarda la variabile f_2 il ragionamento è molto più complesso: essendo f_2 una dimensione importante del particolare è necessario centrare l'attenzione anche sulle peculiarità del ritiro dell'acciaio.

L'analisi da effettuare è del tutto simile al caso generico espresso nel Paragrafo 3.2.9, in cui si ragionava sulla relazione tra conformità dimensionale di un grezzo e di un modello in cera.

L'obiettivo di questa fase è calcolare il range di conformità della quota sul modello in cera cercando di caratterizzare il meglio possibile il ritiro dell'acciaio.

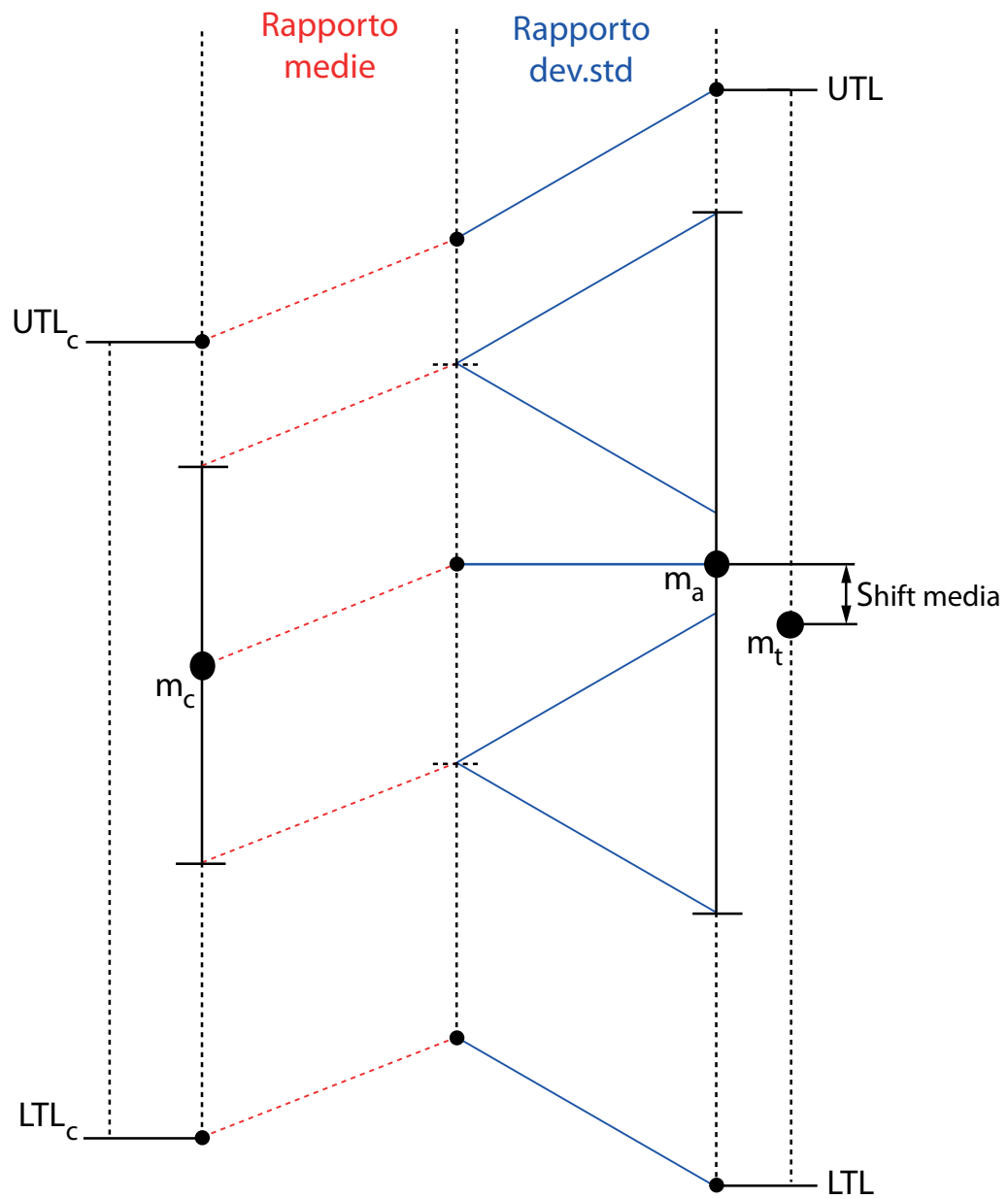


Figura 5.4.7: Schema esplicativo dell'operazione di caratterizzazione della quota f_2

Dopo aver ricavato i rapporti di media e deviazione standard cera/acciaio della dimensione interessata, si applicano al range di tolleranza imposta a disegno.

In questo modo si ricava un intervallo di conformità dimensionale sul modello in cera.

Per meglio comprendere le relazioni che vengono descritte, si consulti lo schema esplicativo in Figura 5.4.7.

Per eseguire questa operazione è necessario conoscere la tolleranza sulla dimensione imposta dal cliente e la variabilità caratteristica dei grezzi di fusione.

Si utilizzano inoltre le misurazioni effettuate sui modelli standard.

Procedendo ordinatamente, sono stati raccolti dei particolari grezzi in produzione dell'item 2577-00: di questi è stata misurata la dimensione f nel punto in cui sono stati misurati i modelli dopo l'esperimento di screening.

Di seguito sono riportate la media e la varianza della dimensione f_a , ossia la quota della forcella inerente ai grezzi misurati:

Variable	Mean	StDev	Minimum	Maximum
f_a	14,393	0,0292	14,350	14,430

Si definiscono a tale riguardo i seguenti termini:

$$m_a = 14,393 \quad (5.4.9)$$

$$s_a = 0,0292 \quad (5.4.10)$$

Per quanto riguarda il campo di tolleranza imposto dal disegno, si prendano come estremi dell'intervallo i seguenti valori:

$$LTL_f = 14,50 \text{ mm} \quad (5.4.11)$$

$$UTL_f = 14,20 \text{ mm} \quad (5.4.12)$$

In ultimo, sono state unite le popolazioni di f_1 e f_2 delle misure effettuate sui modelli iniettati con parametri standard e sono state calcolate media e deviazione standard.

Variable	Mean	StDev	Minimum	Maximum
f_c	14,484	0,0156	14,441	14,501

Si definiscono quindi i seguenti termini:

$$m_c = 14,484 \quad (5.4.13)$$

$$s_c = 0,02156 \quad (5.4.14)$$

Come descritto nei ragionamenti a Paragrafo 3.2.9, si può notare come la variabilità della dimensione del modello in cera sia circa la metà di quella inerente all'acciaio; in questo caso non si usa una stima della differenza della variabilità ma direttamente il rapporto tra i due valori.

Ora, avendo tutti i dati necessari alla caratterizzazione del ritiro, si può procedere al calcolo dei rapporti tra le dimensioni nei vari stati.

Si definisce il ritiro della media tra dimensione in cera e dimensione in acciaio:

$$r\%_m = 100 \cdot \frac{m_c - m_a}{m_c} = 0,631\% \quad (5.4.15)$$

Si definisce ora il rapporto tra le variabilità dei due stati, definito anch'esso in forma di ritiro percentuale. Siccome il ritiro inerente all'acciaio è il maggiore, si utilizza la forma contraria rispetto alla variabile $r\%_m$

$$r\%_s = 100 \cdot \frac{s_a - s_m}{s_a} = 46,599\% \quad (5.4.16)$$

Conoscendo i rapporti tra le medie e le deviazioni standard cera/acciaio, sotto alcune ipotesi, è possibile ricavare il range di conformità di f2.

Ipotizzando che la dimensione interessata debba avere un indice di capacità CP=3, si può sostenere che la media e la deviazione standard relative al campo di tolleranza imposto sia la seguente:

$$m_t = \frac{UTL + LTL}{2} = 14,35 \quad (5.4.17)$$

$$s_t = \frac{UTL - LTL}{6} = 0,05 \quad (5.4.18)$$

Conoscendo ora i due rapporti $r\%_m$ e $r\%_s$, si può calcolare il range di conformità da imporre ad f2.

$$m_{tc} = \frac{m_t}{1 - \frac{r\%_m}{100}} = 14,44 \quad (5.4.19)$$

$$s_{tc} = s_t \cdot \left(1 - \frac{r\%_s}{100}\right) = 0,0267 \quad (5.4.20)$$

Di conseguenza, sempre ipotizzando un indice di capacità $CP=3$, si possono finalmente calcolare i limiti da imporre.

$$LTL_c = m_{tc} - 3 \cdot s_{tc} = 14,36 \text{ mm} \quad (5.4.21)$$

$$UTL_c = m_{tc} + 3 \cdot s_{tc} = 14,52 \text{ mm} \quad (5.4.22)$$

In definitiva, si può assumere che si rispetta la conformità della quota $f2$ è rispettata la condizione:

$$14,36 \leq f2 \leq 14,52 \quad (5.4.23)$$

5.4.4 Definizione dei modelli di regressione

Analizzando i dati relativi alla sperimentazione si è arrivati ad ottenere le dipendenze tra le risposte e i parametri di iniezione.

Riassumendo tali dipendenze:

$$\begin{cases} m2 = f(q, t_{tot}) \\ f2 = f(T_1, q, t_{tot}) \\ v_b = f(T_1, q) \\ v_{lf} = f(T_1, q) \end{cases}$$

Nelle successive elaborazioni ci si concentra su questi risultati e sui modelli ad essi relativi.

E' subito possibile estrarre un importante commento da questi risultati: per definire la conformità di mod.2577 non è necessario agire sui parametri d'iniezione T_2 e P .

Entrambe queste variabili, sono infatti escluse da tutti i modelli sopra elencati, rendendo molto più semplice le analisi successive e restituendo informazioni fondamentali per lo svolgimento di eventuali esperimenti futuri.

Un altro punto a favore della semplificazione dell'elaborazione dei dati è l'assenza di interazioni complesse: in tutti i modelli elaborati non si supera mai l'interazione doppia.

Esaminando i modelli finali del paragrafo precedente tramite un test di regressione lineare, ne risultano delle equazioni che definiscono univocamente la risposta in funzione delle variabili in ingresso.

In particolare, si delineano le seguenti funzioni:

$$m_2 = 107,308 - 0,0108 \cdot q - 0,0191 \cdot t_{\text{tot}} + 0,195 \cdot 10^{-3} \cdot q \cdot t_{\text{tot}} \quad (5.4.24)$$

$$f_2 = 14,782 - 0,00771 \cdot T_1 + 0,719 \cdot 10^{-3} \cdot q + 0,00248 \cdot t_{\text{tot}} \quad (5.4.25)$$

$$v_b = 22,357 - 0,393 \cdot T_1 - 0,559 \cdot q + 0,00982 \cdot T_1 \cdot q \quad (5.4.26)$$

$$v_{lf} = 8,586 - 0,128 \cdot T_1 - 0,0106 \cdot q \quad (5.4.27)$$

Per ogni modello di regressione qui elencato si riporta la tabella [ANOVA](#) e il relativo Contour plot formato dai due fattori più influenti: tali informazioni sono riportate in Figura [5.4.8](#).

Riduzione del modello alle sole condizioni significative

A questo punto è necessario considerare che al netto dei vincoli imposti, i contour plot in Figura [5.4.8](#) evidenziano che due delle quattro funzioni non limitano lo spazio di conformità.

In altre parole, le risposte m_2 e v_{lf} risultano essere sempre conformi all'interno dello spazio dei parametri della sperimentazione di screening. Ciò rende possibile l'eliminazione di queste due condizioni e ragionare solamente sulle due funzioni rimanenti. Ciò nonostante è necessario ragionare sulla loro esclusione dal modello.

Per quanto riguarda m_2 , è senz'altro possibile escluderla dal modello che regola la regione di conformità.

Mettendo in chiaro che la funzione è sempre minore del valore di soglia imposto, è doveroso considerare che anche se la condizione venisse superata di poco (nell'ordine dei decimi di millimetro), non ci sarebbero problemi legati al processo.

Il valore di m_2 dovrà comunque essere tenuto sotto controllo durante gli esperimenti successivi.

Anche la funzione v_{lf} è sempre sotto il valore di soglia imposto ma in questo caso è utile continuare a comprenderlo nel modello.

Come si può vedere dal relativo contour plot in Figura [5.4.8](#), v_{lf} mantiene un valore vicino alla condizione al contorno ($v_{lf} \leq 1$) nei pressi dei limiti dello spazio dei parametri.

Inoltre, si è detto più volte quanto le variabili visive siano importanti per la conformità di un modello in cera.

Ad esempio, se l'ottimizzazione portasse ad un punto di funzionamento con linee di flusso marcate anche se conformi, sarebbe comunque possibile sfruttare il modello v_{lf} con una diversa condizione al contorno, così da modificare l'algoritmo alla base.

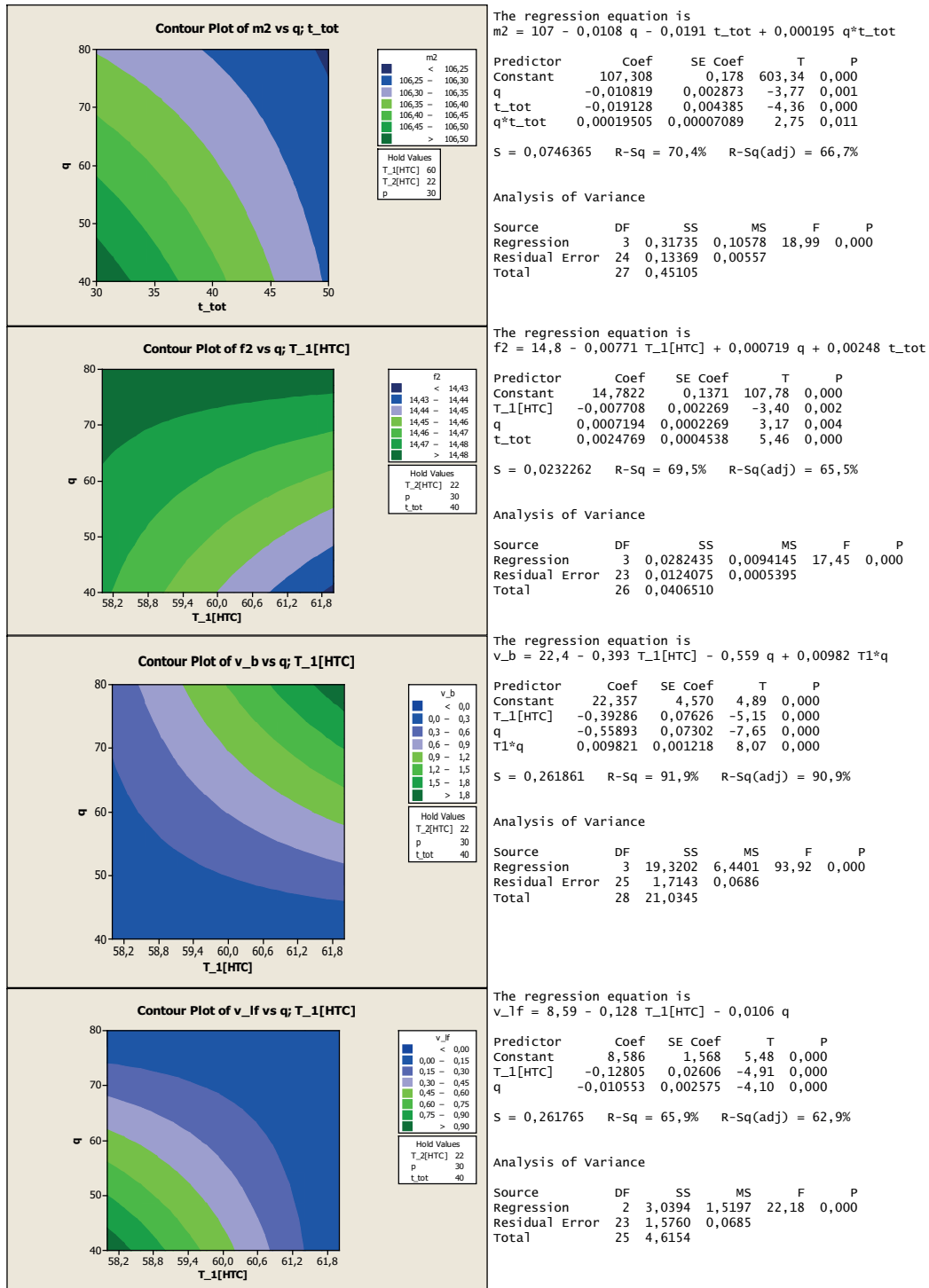


Figura 5.4.8: Informazioni relative alla regressione lineare delle risposte analizzate (il Contour plot riporta i due fattori più influenti del modello)

5.4.5 Ottimizzazione dei parametri d'iniezione per mod. 2577

Per riassumere dati del problema di ottimizzazione, di seguito si riportano i modelli di andamento delle variabili di risposta:

$$\begin{cases} f_2 = 14,782 - 0,00771 \cdot T_1 + 0,719 \cdot 10^{-3} \cdot q + 0,00248 \cdot t_{\text{tot}} \\ v_b = 22,357 - 0,393 \cdot T_1 - 0,559 \cdot q + 0,00982 \cdot T_1 \cdot q \\ v_{lf} = 8,586 - 0,128 \cdot T_1 - 0,0106 \cdot q \end{cases}$$

Inoltre, si riportano le condizioni al contorno del problema. Se tali condizioni vengono rispettate, mod.2577 può essere ritenuto conforme.

$$\begin{cases} 14,36 \leq f_2 \leq 14,52 \\ v_b \leq 1 \\ v_{lf} \leq 1 \end{cases}$$

Si vuole ricercare una regione che rappresenti lo spazio in cui l'impostazione dei parametri d'iniezione porti a modelli conformi.

Tale spazio di conformità può essere trovato sovrapponendo le funzioni ricavate tramite le analisi precedenti, sempre nel rispetto delle condizioni al contorno: questa operazione è stata eseguita tramite un algoritmo appositamente creato tramite il software Matlab©.

L'algoritmo di sovrapposizione

Senza entrare nello specifico, il programma definisce tre vettori discreti indicanti i parametri d'iniezione, limitati dagli estremi sperimentali definiti in Tabella 5.2.2.

Dopodiché crea le varie funzioni come se fossero matrici tridimensionali, dipendenti dai vettori precedentemente definiti.

Una volta definite le matrici, il programma le scorre singolarmente valore per valore, valutando per ognuno di questi se può essere ritenuto conforme oppure no in base alle condizioni al contorno espresse.

Per ogni passaggio su una matrice, ne risulta una matrice binaria con le stesse dimensioni: se compare 1, il valore associato è conforme, viceversa, si è fuori dallo spazio di conformità.

Una volta che questa operazione è stata svolta per ognuna delle quattro matrici create, si sovrappongono le relative matrici binarie. Tale sovrapposizione restituisce una singola matrice binaria tridimensionale che definisce lo spazio di conformità.

Lo spazio di conformità di mod.2577

E' possibile plottare la matrice finale tramite un contour plot in modo che venga evidenziato lo spazio di conformità risultante.

Il grafico si può osservare in Figura 5.4.9: si può subito notare che questo sistema di equazioni ammette un'ampio spazio di esistenza.

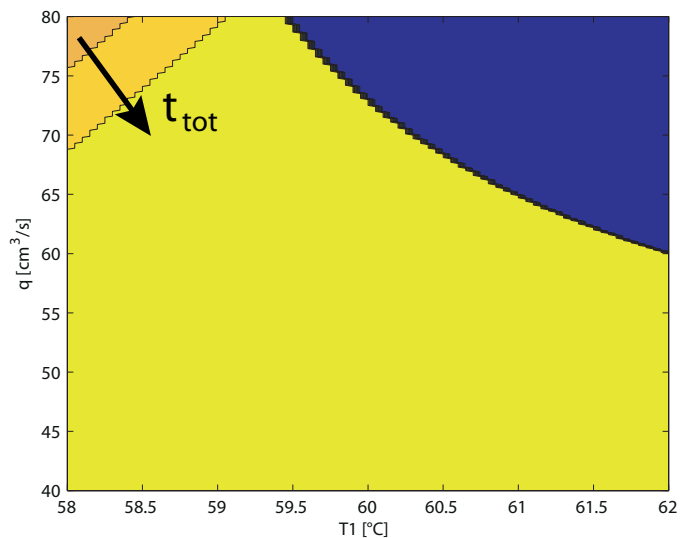


Figura 5.4.9: Contour plot dello spazio dei parametri al variare di t_{tot} (lo spazio di conformità è evidenziata in giallo)

Ciò significa che è possibile selezionare i valori dei parametri d'iniezione con grande libertà, senza ledere alla conformità del modello.

Un secondo commento necessario è inerente al restringimento dello spazio di conformità all'aumentare del tempo di iniezione.

Le variabili di risposta visive v_b e v_{lf} non dipendono dal parametro t_{tot} , perciò questo fenomeno è dovuto all'azione di f_2 .

m_2 era l'unica funzione dipendente da t_{tot} con coefficiente associato negativo: avendola precedentemente eliminata, si può utilizzare il minimo tempo d'iniezione selezionato per la sperimentazione.

Il risultato ottenuto è anche quello che si cercava di ottenere poiché l'obiettivo dichiarato della trattazione era ottimizzare i parametri soprattutto per quanto riguarda i tempi.

Non è perciò necessario l'utilizzo di un algoritmo di ottimizzazione su t_{tot} ; ci si limiterà a ottimizzare i parametri T_1 e q sullo spazio di conformità definito per il minimo t_{tot} selezionabile.

Al netto di questi risultati è inoltre possibile che si possa anche scendere a tempi d'iniezione ancora più bassi, previa apposita sperimentazione.

Impostando perciò il minimo t_{tot} , si ottiene una regione ben definita, riportata in Figura 5.4.10.

Si può notare da tale grafico quanto sia estesa la regione di conformità per questi range dei parametri considerati.

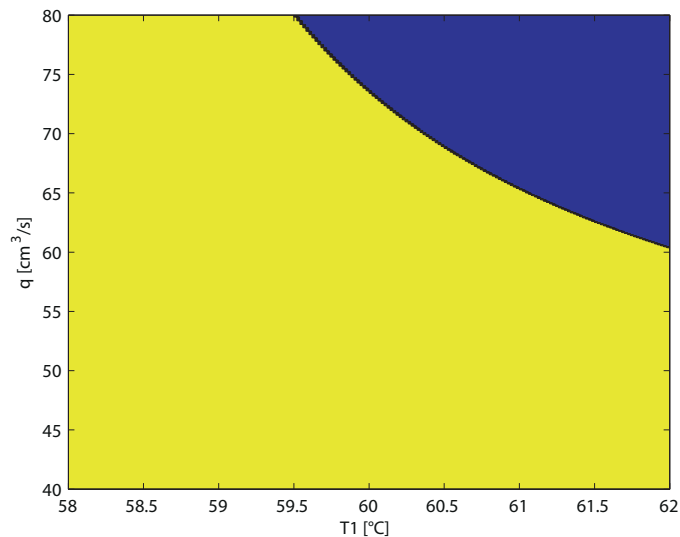


Figura 5.4.10: Contour plot dello spazio dei parametri per $t_{tot} = 30$ s (lo spazio di conformità è indicato in giallo)

Per comprendere meglio l'obiettivo per l'ottimizzazione dei restanti due parametri, è necessaria un'ulteriore considerazione.

Le due variabili di risposta di tipo visivo non sono di uguale importanza: come si è riportato nel Paragrafo 3.2.6, le linee di flusso non sono quasi mai decisive per indicare la conformità di un modello.

Al contrario, la manifestazione di bolle è tenuta in grande considerazione: solitamente la presenza di una sola bolla sul particolare porta ad uno scarto del modello.

Anche in questo caso, tramite le condizioni al contorno su queste variabili, viene assicurata la non presenza di queste due difettosità per lo meno sui prodotti.

Detto ciò, dato che la regione di conformità è così estesa, vale la pena cercare di comprendere come si comporta tale regione al variare delle condizioni al contorno considerate.

Come si è riportato a Pagina 143, la condizione su v_{lf} è sempre rispettata nello spazio dei parametri anche se nelle future sperimentazioni potrebbe essere utile ragionare sul vincolo imposto.

Al netto dell'importanza intrinseca della variabile, per ora non è necessario agire ulteriormente sulla condizione al contorno.

Per quanto riguarda v_b , si è elaborato un contour plot che varia la regione di conformità in funzione della relativa condizione al contorno. Si può valutare tale grafico in Figura 5.4.11.

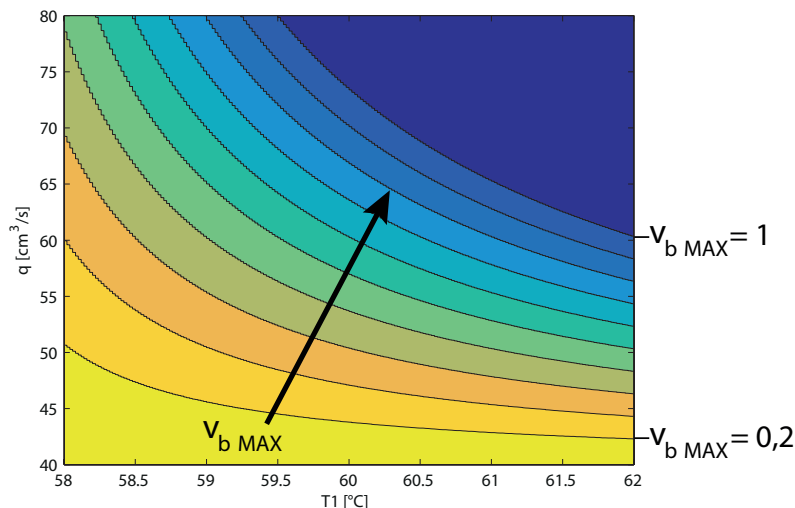


Figura 5.4.11: Contour plot dello spazio dei parametri per $t_{tot} = 30$ s al variare della c.c. sulla variabile di risposta v_b (lo spazio di conformità è evidenziata con i colori più chiari)

Chiaramente, predisponendo una restrizione di questo genere si ha un radicale restringimento della regione di conformità.

Come detto in precedenza, la variabile di risposta v_b è sicuramente un parametro da tenere in grande considerazione. E' perciò necessario utilizzare i parametri che spostano il punto di funzionamento il più lontano possibile dalla regione in cui interviene la condizione su v_b .

Si seleziona perciò il punto di funzionamento della pressa per mod.2577 tramite le considerazioni soprascritte. Formalmente:

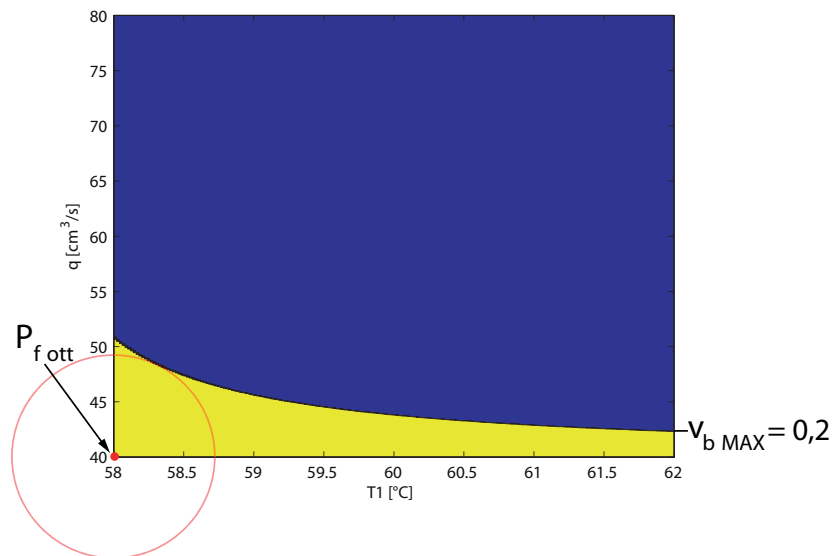


Figura 5.4.12: Contour plot dello spazio dei parametri per $t_{tot} = 30$ s indicante il punto di funzionamento selezionato P_f

Posta la condizione sul tempo d'iniezione ($t_{tot} = 30$), si definisce il generico $P_f = [T1, q]$ esistente nello spazio dei parametri descritto.

Si definisce la circonferenza C_f , così caratterizzata:

- P_f è il centro di C_f
- R_f è il raggio di C_f
- C_f deve essere tangente alla curva indicante la condizione al contorno $v_{b MAX} = 0$

Si ricerca il punto $P_{f_{ott}}$ tale che R_f sia massimizzato. Graficamente, si può osservare l'operazione in Figura 5.4.12.

Detto questo si può affermare che la condizione di funzionamento selezionata per mod.2577, per quanto riguarda i parametri significativi dell'analisi è la seguente:

$$\begin{cases} T1 = 58 \text{ °C} \\ q = 40 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \\ t_{tot} = 30 \text{ s} \end{cases}$$

6 | CONCLUSIONI

6.1 MODELLO 2577: CONFERMA DEI RISULTATI

Il risultato principale derivato dagli esperimenti eseguiti è sicuramente l'ottenimento di uno spazio di conformità per l'iniezione di mod.2577.

Quest'ultimo è definibile come lo spazio multidimensionale dei parametri d'iniezione che porta ad un modello in cera conforme.

Tale spazio dei parametri è stato poi analizzato per individuare il punto di funzionamento teoricamente più conveniente.

Al fine di confermare i risultati teorici ottenuti è stato necessario eseguire un esperimento finale.

L'analisi dei dati dell'*esperimento di conferma* comunica se tutte le elaborazioni eseguite precedentemente hanno portato a dei risultati reali.

L'esperimento di conferma è stato svolto unicamente per testare il punto di funzionamento selezionato nel Paragrafo [5.4.5](#).

A tal proposito è stata eseguita una prova di iniezione di N°16 mod.2577 sulla pressa LC55, utilizzata anche negli esperimenti precedenti. Si sono eseguite N°16 stampate del modello utilizzando sempre la stessa serie di parametri d'iniezione.

Anche in questa fase finale il prelievo e il posizionamento dei modelli sono stati svolti come da standard. Così facendo si ricerca una continuità con l'esecuzione dell'esperimento di screening: è fondamentale non modificare la componente di variabilità data da questi passaggi.

Non tutti i parametri modificabili utilizzati durante lo screening sono risultati significativi una volta analizzati.

I parametri T_2 e P , rispettivamente inerenti alla temperatura di mantenimento dello stampo ed alla pressione di impaccamento della cera in raffreddamento, non sono significativi alla descrizione dello spazio di conformità ricercato.

E' comunque necessario impostare tali parametri sull'interfaccia della pressa ad iniezione; in questo esperimento si è perciò deciso di impo-

starli sui relativi livelli standard, descritti in Tabella 5.2.2, nel Paragrafo 5.2.2.

La serie di parametri impostati per l'esperimento di conferma è riportata di seguito, in Tabella 6.1.1.

Tabella 6.1.1: Valori dei parametri d'iniezione considerati per l'esperimento di conferma

T_1 [°C]	T_2 [°C]	P [bar]	q [cm ³ /s]	t_{tot} [s]
58	22	20	40	30

Questo punto di funzionamento è stato selezionato al fine di minimizzare i tempi e rientrare in una regione teoricamente conforme il più distante possibile dai vincoli imposti.

Inserendo i valori dei parametri d'iniezione nei modelli di regressione utilizzati per creare lo spazio di conformità, si ottengono delle variabili di risposta teoriche.

Chiaramente, più i risultati dell'esperimento di conferma si avvicineranno a queste risposte teoriche, più i modelli saranno vicini alla realtà. Tali valori teorici sono riportati in Tabella 6.1.2.

Tabella 6.1.2: Valori delle variabili di risposta teoriche nel punto di funzionamento, calcolate tramite i modelli di regressione

Risposta	Valore teorico associato
f2 [mm]	14,44
v_b	0
v_{lf}	0,74

Una volta terminata l'iniezione e stabilizzato il materiale, è stato possibile misurare i modelli al fine di controllare le caratteristiche.

Sono state analizzate in modo approfondito solamente le caratteristiche selezionate per definire la conformità del modello, ossia le variabili di risposta f2, v_b e v_{lf} .

Tali variabili sono state descritte ed analizzate ampiamente e a più riprese nel Capitolo 5.

Sono stati verificati anche i valori relativi alle misure non considerate per i modelli.

A partire dalla risposta m2, considerata inizialmente e poi scartata, è stato verificato che tutti le misure rispettino il vincolo imposto ($m2 \leq 106,6$): non sono state riscontrate non conformità in merito.

Anche per le altre risposte, non si sono notati discostamenti significativi, tali da rendere non conformi i modelli prodotti.

La macchina di misura CMM utilizzata è la medesima dell'esperimento di screening, così come il posizionamento per la misurazione e la routine utilizzata (riferimenti in Appendice D.1).

6.1.1 Risultati dell'esperimento

Analizzando le misure delle riposte utilizzate per definire la conformità, si sono cercati eventuali valori che oltrepassano le condizioni al contorno imposte.

In Tabella 6.1.3 si può osservare la situazione dei dati rilevati, completi di condizione al contorno imposta e valore teorico associato.

Tabella 6.1.3: Risultati dell'esperimento di conferma

Risposta	C.C. imposta	Val.teor.	Media	StDev	Min	Max
f2 [mm]	$14,36 \leq f2 \leq 14,52$	14,44	14,46	0,009	14,45	14,48
v_b	$v_b \leq 1$	0	0	0	0	0
v_{lf}	$v_{lf} \leq 1$	0,74	1	0	1	1

Si può notare subito che non ci sono valori misurati al di fuori delle condizioni al contorno imposte ai modelli di regressione.

E' inoltre da sottolineare la bontà dei modelli delle variabili che definiscono il modello, sostanzialmente in linea con le misure analizzate.

Si può anche notare che la prova fornisce una buona ripetitività, visti i valori di deviazione standard molto bassi per quanto riguarda le risposte di tipo dimensionale.

Lo stesso vale per le riposte visive, che rimangono costanti durante l'esperimento.

Esecuzione del test di potenza a valle

Si è inoltre eseguita una verifica della coerenza della variabilità di processo a valle degli esperimenti principali. In pratica si è eseguito nuovamente

il test effettuato durante la preparazione alla sperimentazione, descritto nel Paragrafo 4.2.4.

In questo modo è possibile stabilire se il numero di repliche dell'esperimento di screening sono state sufficienti ad ottenere la potenza necessaria per decretare la significatività dei singoli parametri d'iniezione.

Per questo test si è presa in considerazione la variabile f_2 , in assoluto la variabile dimensionale più importante.

Si sono eseguiti gli stessi passaggi svolti nel Paragrafo 4.2.4, solo utilizzando media e deviazione standard della quota f_2 .

Il risultato che ne consegue è il valore della minima differenza tra le medie (d) per uno scarto imposto del 10%; i passaggi principali e il risultato sono riportati di seguito.

$$f_2 \sim N(\mu_{f_2}, \sigma_{f_2}^2) = N(14,46, 0,0088^2) \quad (6.1.1)$$

$$I_{\text{cera}}(f_2) = \frac{I_{D3}(f_2)}{2} = 14,46 \pm 0,06 \quad [\text{mm}] \quad (6.1.2)$$

$$\begin{aligned} d_{f_2} &= UTL_{f_2} - UL_{f_2 10\%} & (6.1.3) \\ &= 14,52 - 14,48 \\ &= 0,04 \quad [\text{mm}] \end{aligned}$$

Si esegue quindi il test di potenza basato sulle caratteristiche dell'esperimento di screening. Si modificano solamente i parametri del test inerenti alle elaborazioni qui svolte e l'obiettivo del test.

Il test non è infatti volto alla ricerca del numero di repliche da eseguire data una certa potenza; in questo caso si verifica che il numero di repliche svolte ($n = 2$) sia sufficiente per ottenere una potenza sufficientemente elevata.

Nei dati infatti appare il parametro n , mentre la potenza è il risultato del test.

Si osservino i dati inseriti nel test in Tabella 6.1.4 e il grafico risultante in Figura 6.1.1.

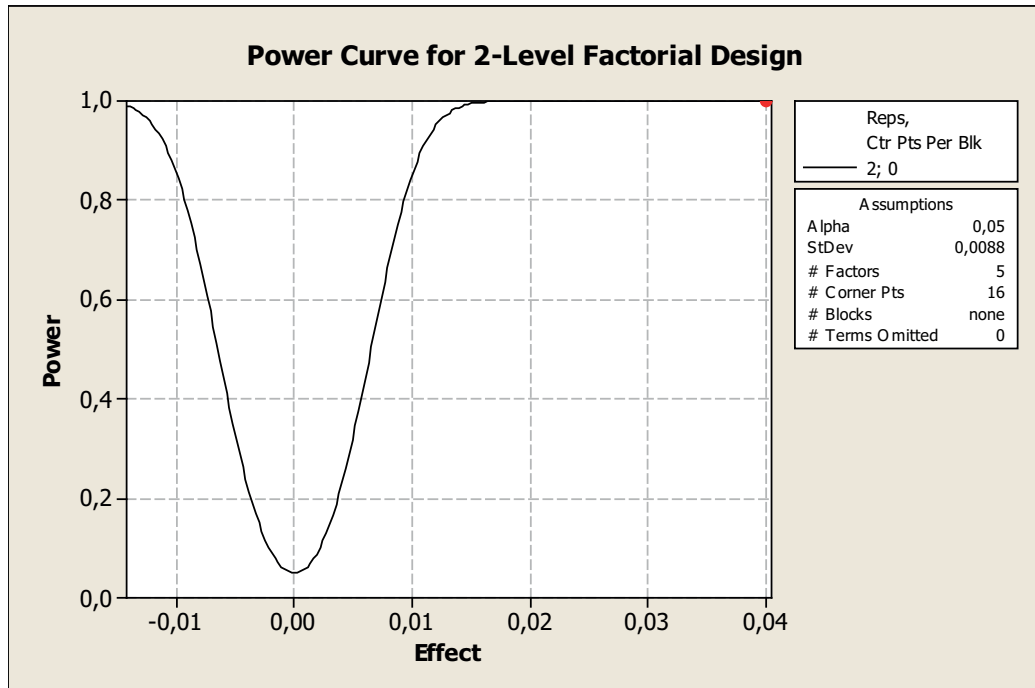


Figura 6.1.1: Risultato del test di potenza effettuato

Tabella 6.1.4: Dati del test di potenza effettuato

Variabile	Valore
k	5
Corner points	16
Center points	0
d	0,04
n	2
S	0,0088
α	0,05

Come si può notare in figura, con questa configurazione si ottiene addirittura una potenza unitaria. I test effettuati durante lo screening possiedono quindi una potenza più che sufficiente per caratterizzare il processo.

6.1.2 Miglioramento continuo del processo

I risultati ottenuti utilizzando il punto di funzionamento descritto sono più che buoni: si è perciò deciso di avviare una prova di processo completa utilizzando i modelli iniettati per l'esperimento di conferma.

Una volta conclusa l'analisi dei dati i modelli sono stati inviati al reparto di assemblaggio dei grappoli in modo che si porti avanti il processo fino ad avvenuta spedizione.

Il riscontro del cliente alla prova in questione sentenzierà se Microcast potrà utilizzare questi parametri d'iniezione per fini produttivi.

Analizzando i dati è comunque possibile asserire che è sicuramente possibile trovare un miglior punto di funzionamento.

Soltanto osservando che il punto selezionato è nell'estremità definita dai limiti utilizzati per lo screening può far pensare che estendendo questi limiti sarebbe possibile spostare ancora il punto selezionato.

Tutti i modelli iniettati per l'esperimento di conferma presentavano linee di flusso marcate, anche se nei limiti imposti dalla conformità.

Senza dover rifare l'esperimento, si potrebbe eseguire un'altra prova processo che però tiene più in considerazione la caratteristica v_{lf} .

Spostando il punto di funzionamento su temperature e portate più alte, si avrebbe il conseguente allontanamento dal vincolo imposto su v_{lf} .

Il valore atteso della risposta ($v_{lf} = 0,74$) è vicino alla condizione imposta ($v_{lf} \leq 1$): se si analizza il limite della conformità al variare del limite imposto su v_{lf} e mantenendo gli altri vincoli, si ottiene una regione di conformità variabile osservabile in [6.1.2](#).

Le curve che descrivono il vincolo imposto si spostano proprio a partire dal punto di funzionamento, percorrendo in obliquo lo spazio T1/q. Pur essendo giudicata conforme, la zona di massimo della funzione v_{lf} corrisponde con il punto di funzionamento selezionato.

Se per questa ragione la qualità giudicasse non conformi i grezzi di fusione derivanti dalla prova analizzata, sarebbe comunque possibile spostare il punto di funzionamento in modo da diminuire l'effetto delle linee di flusso.

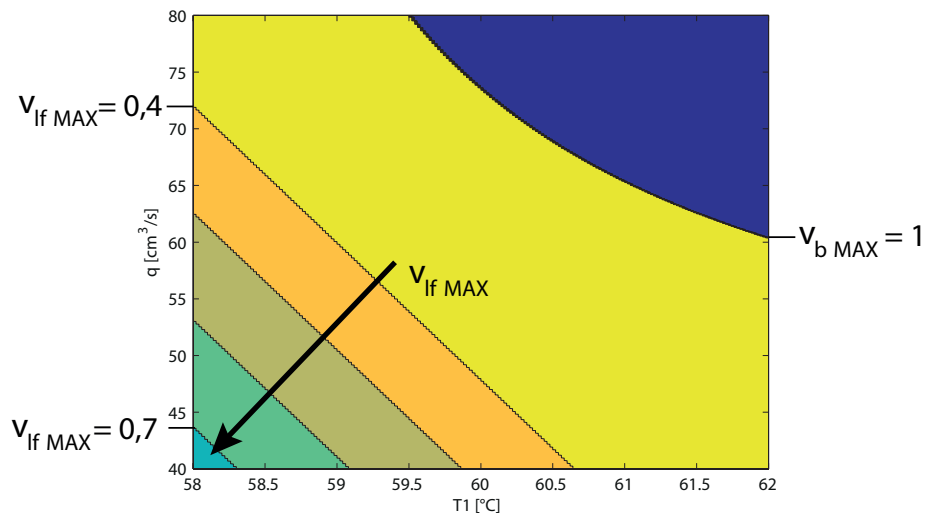


Figura 6.1.2: Regione di conformità al variare del vincolo imposto su v_{lf} ($t_{tot} = 30$ s)

6.2 SVILUPPO DEL PROGETTO AZIENDALE

Il miglioramento del processo di iniezione di mod.2577 è sicuramente il primo vero passo avanti nella realtà del progetto iniziato con l'esecuzione di questa trattazione.

L'obiettivo finale è ottenere un sistema che ordina, classifica, aggiorna e ricava i parametri di iniezione ottimizzati al variare delle caratteristiche misurabili di particolare iniettato e stampo.

Questa trattazione ha posto solamente le basi per la scrittura di questo algoritmo, evidenziando la teoria utilizzabile come base del progetto e inizializzando la procedura per l'ottimizzazione dei parametri d'iniezione.

Ponendo che l'algoritmo venga costruito come è stato descritto nel capitolo introduttivo, l'ottimizzazione dei parametri di mod.2577 restituisce la prima riga di informazioni del database che sta alla base del sistema.

Come esempio e punto di partenza della prosecuzione del progetto, si riporta in Tabella 6.2.1 la totalità delle informazioni raccolte, ossia i parametri misurabili e i parametri modificabili di mod.2577.

Le caratteristiche dei singoli parametri riportati in tabella sono descritte in Capitolo 3 e riassunte in Appendice B.

Tabella 6.2.1: Parametri di progetto di mod.2577

Classi	Parametro	U.mis.	Tipologia	Val. misurato
Temperatura	T_1	[°C]	Numerico	58
	T_2	[°C]	Numerico	21
Pressione	q	$[\frac{cm^3}{s}]$	Numerico	40
	P	[bar]	Numerico	20
Tempo	t_{tot}	[s]	Numerico	30

Classi	Parametro	U.mis.	Tipologia	Val. misurato
Geom.	P_m	$[mm^{-1}]$	Numerico	1,34
	s_{min}	[mm]	Numerico	4,5
	$\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	$[mm^{-1}]$	Numerico	0,274
	V_{tot}	$[mm^3]$	Numerico	203721
	$\frac{A_{p\ max}}{A_{tot}}$		Numerico	$6,416 \cdot 10^{-3}$
	$r_{Ap\ max}$		Numerico	0,7
	l_{max}	[mm]	Numerico	59
Stampo	$\frac{A_{tr}}{A_{tot}}$		Numerico	0,081
	$\frac{A_e}{A_{tot}}$		Numerico	$5,27 \cdot 10^{-3}$
	PR_{3p}		ON/OFF	OFF
	$\frac{A_{ic}}{A_{tot}}$		Numerico	$0,89 \cdot 10^{-3}$
	PR_{raff}		ON/OFF	OFF
	$\frac{V_{fc}}{V_{tot}}$		Numerico	0
	PR_{sf}		ON/OFF	ON
	$\frac{V_{vc}}{V_{tot}}$		Numerico	0,103
	n_{vc}		Numerico	16
	$r_{vc\ max}$	[mm]	Numerico	15,4

Chiaramente, lo sviluppo del lavoro descritto potrebbe richiedere anni di sperimentazione e immagazzinamento dei dati; ciò nonostante questo sforzo mira a sicuri risvolti positivi connessi ai costi e al miglioramento tecnico della fase di iniezione.

6.2.1 Considerazioni sui costi

Per comprendere la connessione di ciò che si è realizzato e il risparmio potenziale dell'intero progetto è doveroso ragionare sul miglioramento di mod.2577.

Essenzialmente, durante la trattazione si è selezionato uno degli item più prodotti in azienda e se ne è migliorata la fase di iniezione, mantenendo la conformità dei modelli ma riducendo i tempi totali.

I valori del tempo di iniezione totale prima e dopo la sperimentazione sono riportati in Tabella 6.2.2.

Tabella 6.2.2: Tempi totali d'iniezione per 2577-00

Variabile	Valore	Descrizione
$t1_{tot}$	40 s	Tempo totale di iniezione prima della sperimentazione
$t2_{tot}$	30 s	Tempo totale di iniezione a fronte della sperimentazione

Se il cliente approvasse i particolari derivanti dall'esperimento di conferma descritto precedentemente, questo risultato potrebbe essere largamente sfruttato in produzione, diminuendo il *cycle time* d'iniezione di una percentuale pari al rapporto $r_t\%$, come riportato in Equazione 6.2.1.

$$r_t\% = \left(1 - \frac{t1_{tot}}{t2_{tot}}\right) \cdot 100 = 25\% \quad (6.2.1)$$

Visti gli altissimi volumi di produzione, il processo inerente a 2577-00 è già fortemente ottimizzato, in modo da ridurre il più possibile i costi. Una riduzione dei tempi della fase di iniezione a fronte degli esperimenti attuati può solo migliorare il margine di profitto del prodotto.

La riduzione del *cycle time* di iniezione per mod.2577 a fronte della sperimentazione eseguita porta ad una sostanziale minorazione dei costi complessivi.

A fronte di un costo medio stimato per l'utilizzo della pressa e della mano d'opera è possibile calcolare di quanto la riduzione dei tempi di ciclo incide sui costi effettivi.

Si riportano in Tabella 6.2.3 le informazioni necessarie alla stima dei costi di iniezione dei particolari 2577-00.

Tabella 6.2.3: Informazioni utili alla stima dei costi di iniezione di 2577-00

Variabile	Valore	Descrizione
c_h	24 €/h	Costo orario di iniezione (macchina + mano d'opera + materiali + energia)
V_p	250.000 pz/aa	Volume di produzione annuo
N_{imp}	8	N° di impronte presenti nello stampo
$s\%$	20%	Scarto percentuale previsto totale del processo
Δt_{tot}	10 s	Differenza tra i tempi di iniezione ($t_{1_{tot}} - t_{2_{tot}}$) prima e dopo la sperimentazione

Utilizzando queste informazioni si può definire il generico costo annuale d'iniezione di un particolare a fronte di un tempo totale di iniezione t_{tot} .

$$c_{aa} = c_h \cdot \frac{t_{tot} \cdot V_p \cdot (1 + \frac{s\%}{100})}{3600 \cdot N_{imp}} \text{ [€/anno]} \quad (6.2.2)$$

Al fine di stimare il risparmio annuale Δc_{aa} dato dalla riduzione dei tempi per l'item 2577-00, si inserisce nell'Equazione 6.2.2 il valore della differenza tra i due tempi d'iniezione Δt_{tot} .

$$\Delta c_{aa} = c_h \cdot \frac{\Delta t_{tot} \cdot V_p \cdot (1 + \frac{s\%}{100})}{3600 \cdot N_{imp}} \simeq 2500 \text{ €/anno} \quad (6.2.3)$$

Tenendo fissi tutti i parametri tranne Δt_{tot} il risparmio annuale è chiaramente del 25%, come risultava anche il rapporto tra i tempi d'iniezione in Equazione 6.2.1.

Il risparmio netto non sembra elevato se messo in rapporto al fatturato di un'azienda come Microcast, ma è necessario pensare che si tratta del risparmio netto annuale su un'unica fase del processo inerente ad un solo codice prodotto su circa duemila totali.

Il valore calcolato è inoltre da porre in relazione al basso impatto dato dalla sperimentazione: per il miglioramento dell'iniezione di mod.2577, la pressa è rimasta occupata circa $t_{sper} = 10$ h.

Senza contare che si prevede un aumento della produzione del particolare studiato, se il tempo di vita di 2577-00 fosse di cinque anni e i volumi di produzione rimanessero invariati si avrebbe un Δc_{aa} così calcolato:

$$\Delta c_{5aa} = 5 \cdot \Delta c_{aa} - c_h \cdot t_{\text{per}} \simeq 12260 \text{ €} \quad (6.2.4)$$

Un'idea più precisa del risparmio che porterebbe un miglioramento del processo su larga scala è dato da un'espansione di questo ragionamento a più codici.

Si ipotizza di applicare lo stesso tipo di sperimentazione sui dieci codici più prodotti in azienda e di riuscire ad ottenere gli stessi risultati di 2577-00, ossia un risparmio netto dei tempi del 25%.

In Figura 6.2.1 si riporta il costo standard annuale impiegato (consuntivo 2013) per l'iniezione di ognuno dei dieci codici più prodotti in Microcast.

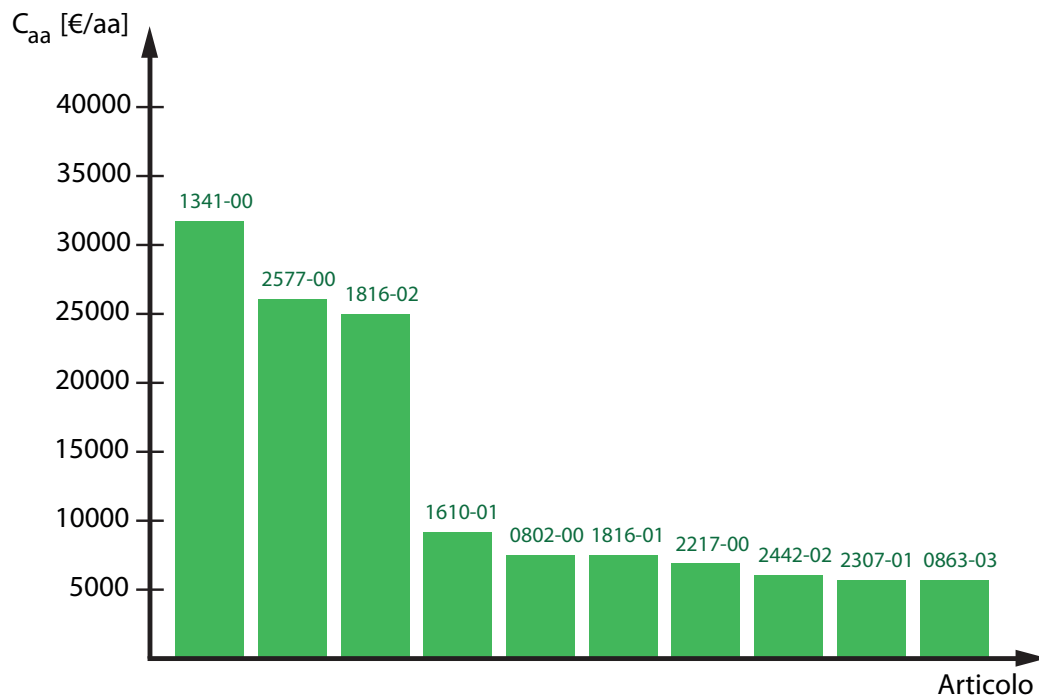


Figura 6.2.1: Tempo di iniezione annuale dei dieci codici più prodotti in Microcast

Come t_{tot} di partenza (pre-sperimentazione) si utilizza il tempo standard in battuta, definito in Equazione 4.1.1.

$$t_{\text{tot}} = t_{\text{ct}} = 2,4 \text{ min} \quad (6.2.5)$$

Se sulla sommatoria di questi costi annuali si risparmiasse $r_{t\%} = 25\%$ come per l'articolo investigato, si otterrebbe un risparmio come calcolato di seguito.

$$\Delta c_{\text{aa tot}} = r_{t\%} \cdot \sum_{i=1}^{10} c_h \cdot \frac{t_{\text{std}} \cdot V_{p i} \cdot (1 + \frac{s\%}{100})}{3600 \cdot N_{\text{imp } i}} \quad (6.2.6)$$

$$\simeq 32500\text{€}/\text{anno} \quad (6.2.7)$$

Basandosi su informazioni a consuntivo il valore calcolato non può sicuramente rispecchiare con precisione il risparmio annuale che si otterrebbe realmente; ciò nonostante questo è un buon indice di ciò che si potrebbe ottenere decidendo di migliorare il processo di iniezione su vasta scala.

Fin ora si è inoltre ignorato un punto fondamentale che ha a che vedere solo indirettamente con i costi: il miglioramento dei tempi qui proposto non andrebbe solo ad incidere sui costi diretti dell'iniezione ma su tutto il processo.

Ponendo che il tempo impiegato annuale per l'iniezione diminuisse di $r_{t\%}$, anche l'operatore che si occupa della pressa utilizzerebbe solo una percentuale del suo tempo di lavoro.

Ciò significa che il tempo risparmiato del suddetto operatore potrebbe essere sfruttato per altre mansioni, andando a diminuire sensibilmente i tempi e i costi in altre fasi del processo.

Per quanto riguarda i costi di attuazione della sperimentazione su larga scala, è realistico affermare che i tempi di sperimentazione diminuirebbero sempre più ad ogni stampo analizzato.

Per ogni turno di sperimentazione, l'esperienza, le tecniche di progettazione e di analisi dei piani sperimentali andrebbero sempre a migliorarsi. Un esempio che si può portare immediatamente è la possibilità di frazionare ancora di più i piani sperimentali utilizzati, in quanto si è osservato che non esistono interazioni complesse significative tra i parametri di iniezione.

Non avendo pericolo di confounding tra gli effetti dei fattori, è quindi possibile progettare piani caratterizzati da meno esperimenti, e quindi più brevi.

Un altro punto in direzione del minor costo di attuazione è l'utilizzo dei piani Split-plot a causa dell'esistenza di fattori [HTC](#) nel processo.

Si è infatti evidenziato nell'analisi dei dati che la mancata casualizzazione non provoca errori di grande interesse durante le analisi delle misure.

Ciò invita lo sperimentatore a continuare sulla stessa strada senza dover preoccuparsi del pericolo di incorrere in problemi relativi alla decasualizzazione degli esperimenti.

A livello di miglioramento puramente tecnico, durante i prossimi turni di sperimentazione si potrebbe ricorrere all'utilizzo di tecniche apposite per l'analisi dei dati discreti (variabili inerenti a risposte visive) come la regressione logistica ordinale.

Avendo progettato l'esperimento principale di mod.2577 per una classica analisi [ANOVA](#), non è stato possibile studiare i dati con metodologie più consone. Ciò nonostante, i modelli costruiti si adattano perfettamente ai dati raccolti.

6.2.2 Avanzamento tecnico relativo al progetto

Per quanto riguarda i miglioramenti non connessi direttamente ai costi dell'azienda, l'avanzamento del progetto porterebbe a diversi sviluppi certamente positivi.

Tali risvolti positivi sono subordinati ad un continuo e attento avanzamento del progetto descritto.

Sarà necessario innanzitutto cominciare con il miglioramento degli stampi più utilizzati, seguendo le indicazioni dell'apposito algoritmo di ordinamento esposto in Sezione [4.1](#).

Ciò porterà ad ottenere le prime righe del database per l'algoritmo obiettivo del progetto.

L'espansione del database sarà subordinata al continuo sforzo sperimentale che deve essere appunto operato per ogni nuovo stampo realizzato e per gli stampi che meglio completano le mancanze di informazioni.

Sarà inoltre necessario espandere i ragionamenti effettuati a più sistemi di iniezione, in quanto tutte le analisi svolte sono state ottimizzate solamente per le presse di tipo LC55.

Un'ulteriore necessità è lo sviluppo di piani per quanto riguarda gli stampi caratterizzati dalla presenza di più particolari, piuttosto comuni in Microcast.

Un problema del genere potrebbe richiedere una sperimentazione per codice, in modo da ricavare lo spazio di conformità per la singola geometria iniettata.

Fatto ciò, sarebbe possibile intersecare le regioni di conformità ottenute per ricavare lo spazio utile dei parametri.

Se queste ed altre azioni venissero portate avanti nel tempo, gli sviluppi tecnici ed economici sarebbero senz'altro positivi.

In primo luogo, si potrebbero centrare gli obiettivi preposti: aumentare il database e sviluppare l'algoritmo può portare ad una maggiore conoscenza del processo di iniezione e ad una più rapida progettazione degli stampi.

Avendo già in mano parametri ottimizzati si escluderebbe la dipendenza dall'esperienza del tecnico. Così facendo la fase di iniezione risulterebbe standardizzata e semplificata sia per l'operatore, sia per il responsabile tecnico.

Un'esperienza di questo tipo potrebbe avere risvolti connessi a possibili brevetti inerenti all'algoritmo descritto e/o al suo sfruttamento economico.

E' inoltre realistico presupporre che si potrebbe ulteriormente sviluppare l'algoritmo per creare un eventuale software di preventivazione o di progettazione degli stampi, interconnettendo le informazioni di natura tecnica a quelle di natura produttiva/logistica.

In relazione all'avanzamento passo-passo del progetto, con il tempo si otterrebbe una conoscenza generalizzata delle procedure [DOE](#) per il miglioramento del processo, facilitando un'attuazione anche ad altre fasi del processo Microcast.

Un approccio così descritto porta necessariamente ad una comprensione più formata ed estesa del concetto di conformità in tutti i reparti interconnessi al progetto.

In aggiunta si creerebbe una maggiore conoscenza delle difettosità riscontrabili sui modelli in cera e sui grezzi di fusione.

Per i fini di miglioramento ricercati, lo sviluppo teorico del progetto (Capitolo 3) è un punto di partenza solido e innovativo per molti punti di vista.

Elaborando tali informazioni è anche possibile un automatico aggiornamento della documentazione tecnica inerente all'analisi della conformità dei modelli in cera.

Questa base teorica può inoltre essere utilizzata per fini didattici all'interno dell'azienda, in modo da istruire i tecnici e gli operatori su questa fase del processo di Investment casting.

In ultima analisi, è doveroso un commento alla mia esperienza personale. E' innanzitutto importante sottolineare il sensibile aumento della mia personale preparazione nella branca della statistica applicata al processo industriale, utilizzabile in futuro per migliorare e sviluppare l'ingegneria e la qualità aziendale.

Portare avanti questo progetto (e in particolare lo sviluppo di questa trattazione) è risultato di grande interesse ingegneristico, poiché ho sviluppato e studiato aspetti del processo mai approfonditi prima.

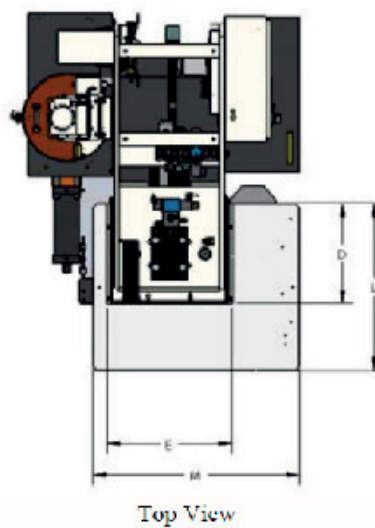
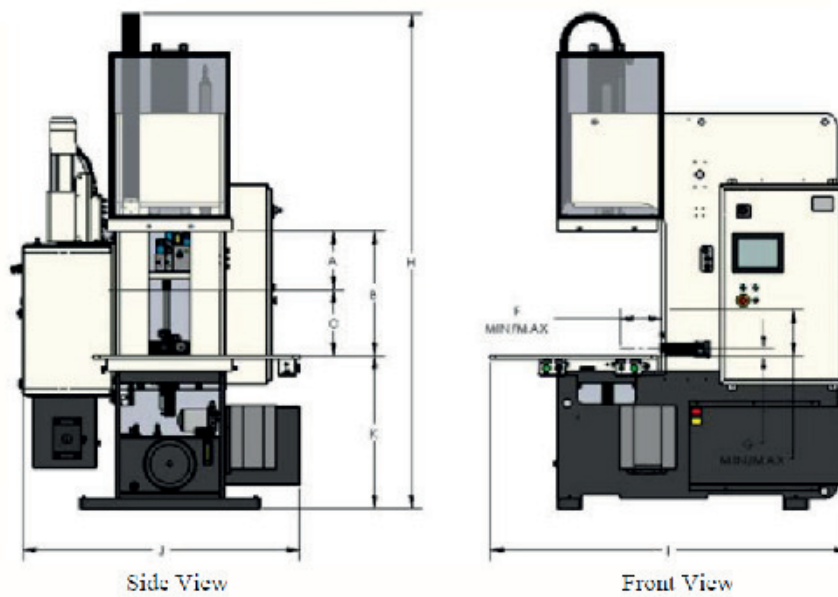
Nonostante i cinque anni passati in azienda, lo sviluppo dei concetti e della progettazione degli esperimenti mi hanno avvicinato sensibilmente alla totale comprensione del processo di iniezione dei modelli in cera.

Grazie a questa esperienza è per me possibile addentrarmi ancora di più nella gestione dell'ingegneria alla base di questa precisa fase del processo Microcast.

Appendici

A

SPECIFICHE TECNICHE PRESSA LC55



Clamp Force	45.4 ton
Platen Speed Close Rapid (Optional)	(47mm/sec)
Platen Speed Close Slow	23 mm /sec
Platen Speed Open	49 mm/sec
A. Stroke	660 mm
B. Daylight Maximum	762 mm
C. Daylight Minimum	102 mm
D. Width of Platens	610 mm
E. Depth of Platens	762 mm
F. Nozzle In/Out Adjustment	76 - 330 mm
G. Nozzle Up/Down Adjustment	57 - 254 mm
H. Overall Height	3113 mm
I. Overall Width	2308 mm
J. Overall Depth	1829 mm
K. Work Area to Floor	930 mm
L. Work Area Width	1016 mm
M. Work Area Depth	1251 mm
Die Mount Holes	M10
Wax Reservoir Capacity	114 liter
Wax Reservoir Cooling Capacity	90 kg/hr @ ΔT of 15°C
Single Shot Capacity	2.5 liter
Injection Pressure	3.5 - 70 bar
Injection Rate	0 - .2 l/sec
Injection Time	0 - 999 second
Nozzle Tip	9.5 mm radius
Hydraulic Reservoir Capacity	125 liter
Hydraulic Cooling Water	11 l/min @ 27°C
Electrical Standard	380V, 50Hz, 3ph
Power Requirement	14.5 KVA
Air Requirement	5.3 bar
Machine Weight	4423 kg

Figura A.0.2: Specifiche tecniche della pressa LC55 utilizzata per la sperimentazione

B | ELENCO DEI PARAMETRI DI PROGETTO

Nelle due Tabelle [B.0.4](#) e [B.0.5](#), si riassume la totalità delle variabili di progetto, rispettivamente nella forma dei parametri d'iniezione (modificabili) e dei parametri misurabili.

Nella Tabella [B.0.6](#) si riportano i legami tra variabili misurabili e difettologie dei modelli in cera ipotizzate nella Sezione [3.2](#).

Tabella B.0.4: Tabella riassuntiva totale dei parametri d'iniezione

Classi	Parametro	U.mis.	Descrizione	Tipologia
Temperatura	T_1	[°C]	Temperatura della cera rilevata all'ugello	Numerico
	T_2	[°C]	Temperatura delle due piastre rilevata	Numerico
Pressione	q	$[\frac{cm^3}{s}]$	Portata entrante di cera durante l'iniezione	Numerico
	P	[bar]	Pressione del cilindro di iniezione (paragonabile alla pressione di impaccamento della cera)	Numerico
Tempo	t_{tot}	[s]	Tempo totale d'iniezione	Numerico

Tabella B.0.5: Tabella riassuntiva totale dei parametri di progetto misurabili non modificabili

Classi	Parametro	U.mis.	Descrizione	Tipologia
Geom.	P_m	$[mm^{-1}]$	Parametro indice della massima <i>mensola</i> del modello	Numerico
	s_{min}	$[mm]$	Spessore minimo misurato	Numerico
	$\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	$[mm^{-1}]$	Rapporto tra superficie esposta e volume totale del modello	Numerico
	V_{tot}	$[mm^3]$	Volume totale del modello	Numerico
	$\frac{A_{p\ max}}{A_{tot}}$		Area della superficie esposta più ampia (normalizzata)	Numerico
	$r_{Ap\ max}$		Rapporto indice della sezione di passaggio del flusso diviso (normalizzato)	Numerico
	l_{max}	$[mm]$	Lunghezza massima del modello	Numerico
Stampo	$\frac{A_{tr}}{A_{tot}}$		Superficie totale di trattenimento (normalizzata)	Numerico
	$\frac{A_e}{A_{tot}}$		Sezione di spinta totale estrattori (normalizzata)	Numerico
	PR_{3p}		Presenza terza piastra	ON/OFF
	$\frac{A_{ic}}{A_{tot}}$		Area sezione ingresso cera (normalizzata)	Numerico
	PR_{raff}		Presenza raffreddanti	ON/OFF
	$\frac{V_{fc}}{V_{tot}}$		Volume del massimo foro cieco (normalizzato)	Numerico
	PR_{sf}		Presenza sfiati	ON/OFF
	$\frac{V_{vc}}{V_{tot}}$		Massimo volume cieco (normalizzato)	Numerico
n_{vc}		Numero dei volumi ciechi presenti nel modello	Numerico	
	$r_{vc\ max}$	$[mm]$	Massimo rapporto tra volume cieco e relativa superficie di chiusura	Numerico

Tabella B.0.6: Tabella delle dipendenze tra parametri misurabili e difettologie considerate

Difettologie	Classi	
	Geometria	Stampo
Deformazioni per errato posizionamento	P_m	NaN
Deformazioni in estrazione	NaN	$\frac{A_{tr}}{A_{tot}}, \frac{A_e}{A_{tot}}, PR_{3p}$
Incompletezze	$s_{min}, \frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	$\frac{A_{ic}}{A_{tot}}$
Avvallamenti	$V_{tot}, \frac{A_{p\ max}}{A_{tot}}, \frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	$\frac{A_{ic}}{A_{tot}}, PR_{sf}$
Rigonfiamenti	$\frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	$\frac{V_{fc\ max}}{V_{tot}}, PR_{sf}$
Linee di flusso	$V_{tot}, \frac{A_{tot}}{V_{tot}}$	PR_{sf}
Bolle d'aria	NaN	$\frac{V_{vc}}{V_{tot}}, n_{vc}, r_{vc\ max}, PR_{sf}$
Giunti freddi	$s_{min}, r_{Ap\ max}$	PR_{sf}
Anomalie dimensionali lineari	V_{tot}, l_{max}	$\frac{A_{tr}}{A_{tot}}, PR_{raff}$

C

DISEGNI DEI MODELLI STUDIATI

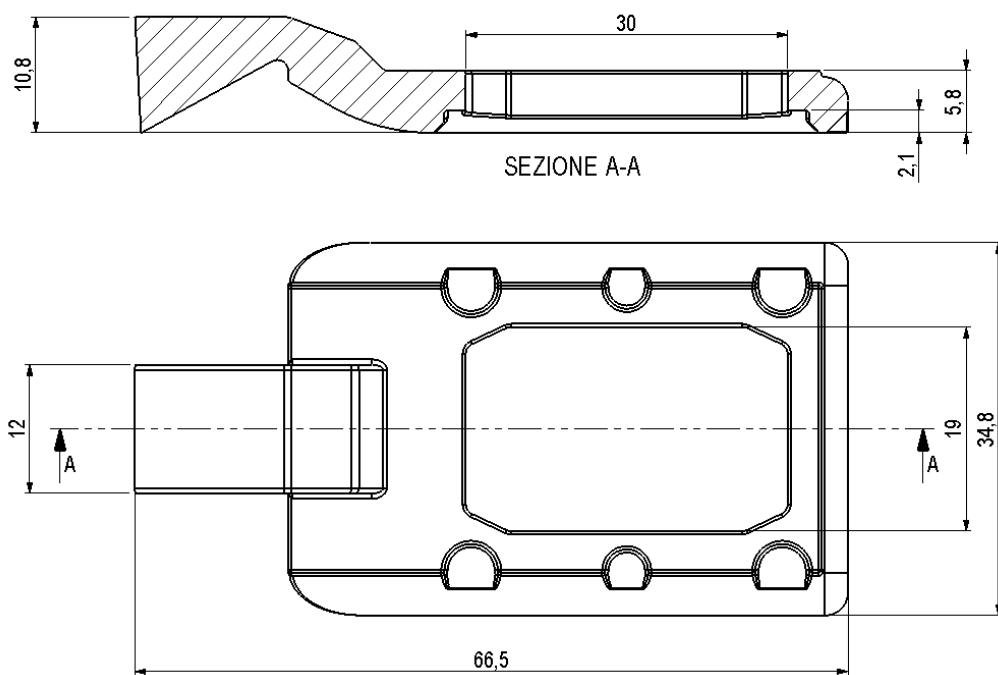


Figura C.0.3: Disegno di massima di mod. 2648-08 (dimensioni relative al grezzo di fusione)

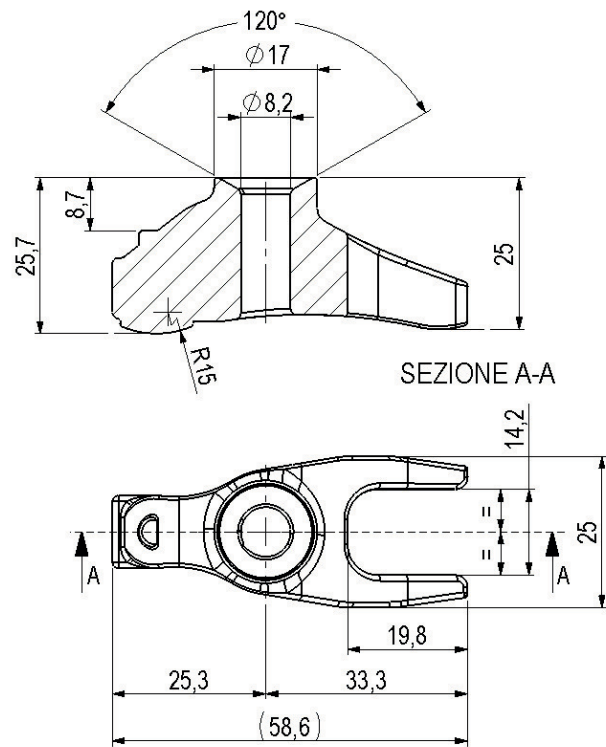


Figura C.0.4: Disegno di massima dell'item 2577-00 (dimensioni relative al grezzo di fusione)

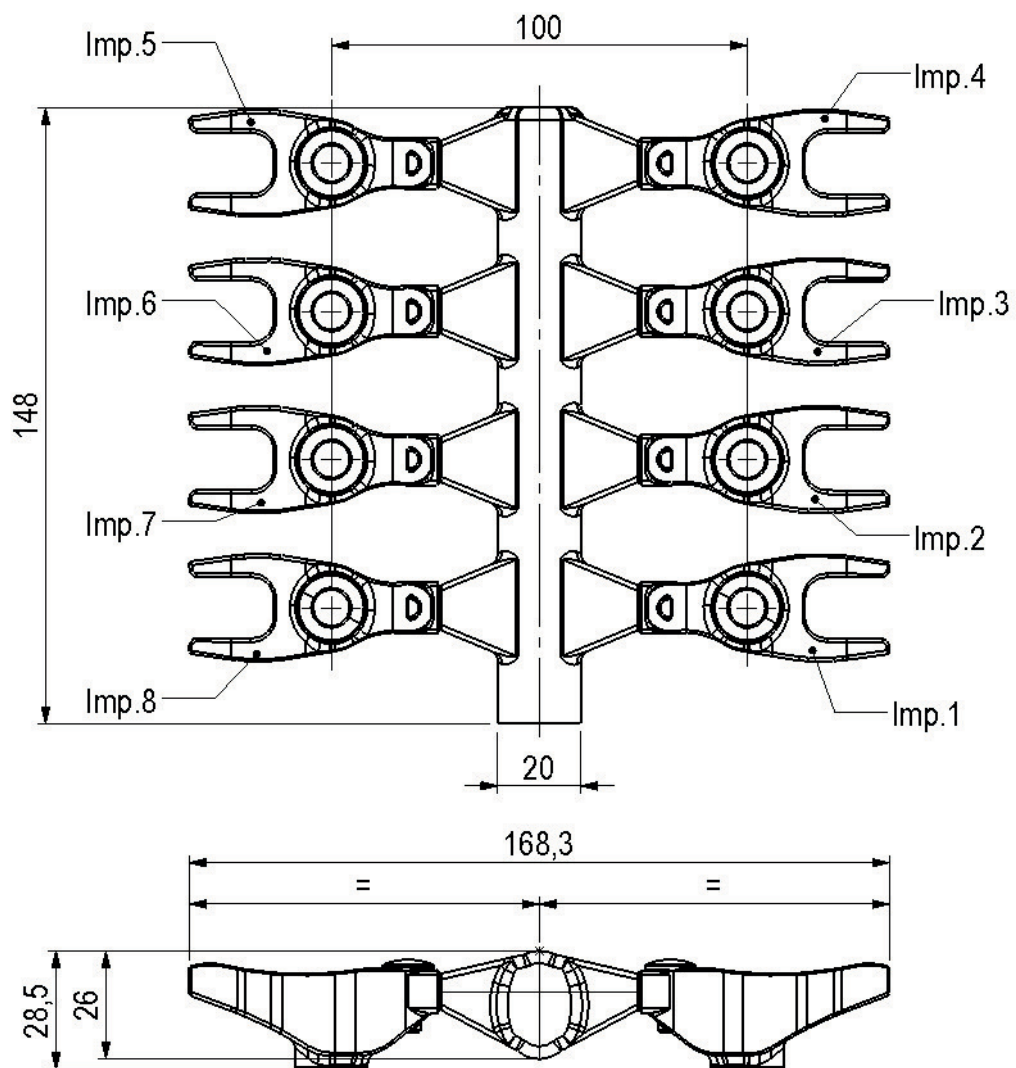


Figura C.0.5: Disegno di massima di mod. 2577 (dimensioni relative al grezzo di fusione)

D | MISURAZIONE RISPOSTE MOD. 2577

D.1 ROUTINE DI MISURA TRAMITE CMM

ACQUISIZIONE RIFERIMENTI	
Operazione	Descrizione op.
Acquis. $P_1 \div P_3$ Defin. <i>PianoA</i>	Vedere Figura D.1.1 . Passante per $P_1 \div P_3$.
Acqis. P_5 Defin. <i>PianoB</i>	Vedere Figura D.1.1 . Passante per <i>AsseX</i> della <i>CMM</i> e P_5 .
Acquis. $P_6 \div P_9$ Defin. <i>Circ1</i>	Vedere Figura D.1.1 . Circonferenza passante per $P_6 \div P_9$.
Acquis. $P_{10} \div P_{13}$ Defin. <i>Circ2</i> Defin. <i>Seg1</i>	Vedere Figura D.1.1 . Circonferenza passante per $P_{10} \div P_{13}$. Segmento passante per i centri di <i>Circ1</i> e <i>Circ2</i> .
Defin. <i>Seg1Y</i> Defin. <i>PmY</i>	Proiezione di <i>Seg1</i> su <i>PianoB</i> . Punto medio di <i>Seg1Y</i>
Defin. <i>AsseZ</i> Defin. <i>AsseY</i> Defin. <i>AsseX</i>	\perp a <i>PianoA</i> . Lungo <i>Seg1Y</i> . \perp a <i>AsseY</i> e <i>AsseZ</i> .
Defin. 0 assi	Vedere Figura D.1.1 ($X_0 = X_{P_5}$, $Y_0 = Y_{PmY}$, $Z_0 = Z_{PianoA}$).

Tabella D.1.1: Routine automatica di acquisizione dei riferimenti per la misurazione del mod.2577

ACQUISIZIONE DATI SENSIBILI	
Operazione	Descrizione op.
Acquis. P_{14}	Vedere Figura D.1.2.
Defin. Seg_2	Distanza tra $PianoB$ e P_{14} lungo $AsseZ$.
Acquis. P_{15}	Vedere Figura D.1.2.
Defin. Seg_3	Distanza tra $PianoB$ e P_{15} lungo $AsseZ$.
Acquis. $P_{16} \div P_{19}$	Vedere Figura D.1.2.
Defin. $Circ_3$	Circonferenza passante per $P_{16} \div P_{19}$.
Acquis. $P_{20} \div P_{23}$	Vedere Figura D.1.2.
Defin. $Circ_4$	Circonferenza passante per $P_{20} \div P_{23}$.
Defin. Seg_4	Segmento passante per i centri di $Circ_3$ e $Circ_4$.
Defin. Seg_4Y	Proiezione di Seg_4 su $PianoB$.
Acquis. P_{24}, P_{25}	Vedere Figura D.1.2.
Defin. Seg_5	Distanza $P_{24}-P_{25}$ lungo $AsseZ$.
Acquis. P_{26}, P_{27}	Vedere Figura D.1.2.
Defin. Seg_6	Distanza $P_{26}-P_{27}$ lungo $AsseZ$.

Tabella D.1.2: Routine automatica di acquisizione dei dati per le analisi di mod.
2577

EMISSIONE OUTPUT DI MISURA	
Operazione	Descrizione op.
Emiss. bb1	Lunghezza di <i>Seg4Y</i> .
Emiss. bb2	Lunghezza di <i>Seg1Y</i> .
Emiss. m1	Lunghezza di <i>Seg2</i> .
Emiss. m2	Lunghezza di <i>Seg3</i> .
Emiss. f1	Lunghezza di <i>Seg5</i> .
Emiss. f2	Lunghezza di <i>Seg6</i> .
Emiss. α	Angolo tra <i>Seg1Y</i> e <i>Seg4Y</i> .

Tabella D.1.3: Routine automatica di emissione delle risposte per l'analisi di mod. 2577

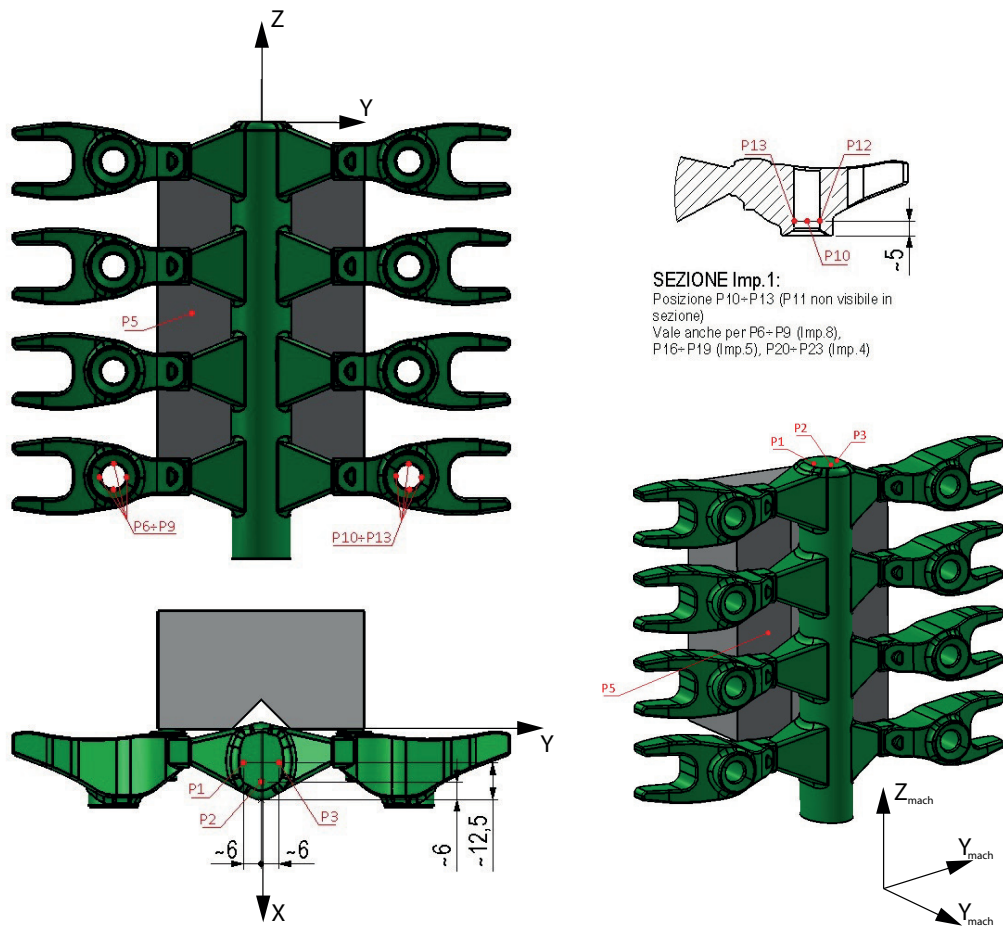


Figura D.1.1: Posizione dei punti acquisiti per la definizione dei riferimenti di misura di mod. 2577

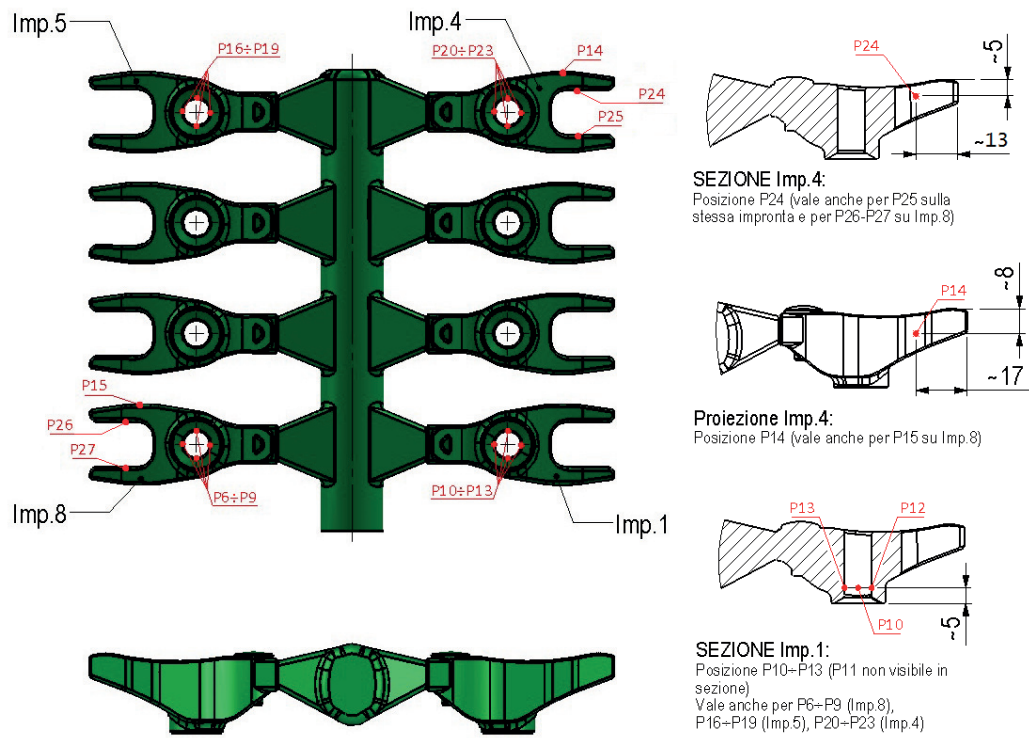


Figura D.1.2: Posizione dei punti acquisiti per la successiva emissione delle risposte

D.2 SCALA VISIVA ORDINALE


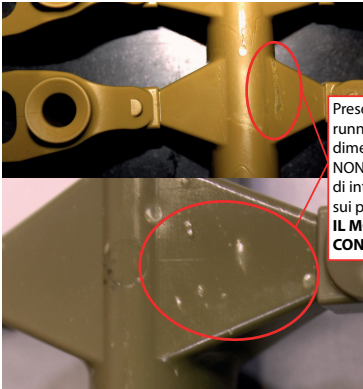


Valore scala	Immagine
0	
1	 <p>Presenza di bolle sul runner, anche di grandi dimensioni. NON sono presenti segni di intrappolamento d'aria sui pezzi. IL MODELLO E' RITENUTO CONFORME.</p>
2	 <p>Presenza di bolle sul runner e/o sul pezzo. IL MODELLO E' RITENUTO NON CONFORME.</p>
3	 <p>Presenza massiva di bolle sul runner e/o sul pezzo. IL MODELLO E' RITENUTO NON CONFORME.</p>

Tabella D.2.1: Scala di caratterizzazione visiva per la valutazione della presenza di bolle d'aria


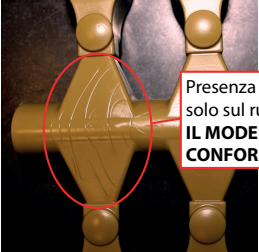

Valore scala	Immagine
0	
1	 <p data-bbox="906 658 1126 748">Presenza di linee di flusso solo sul runner. IL MODELLO E' RITENUTO CONFORME.</p>
2	 <p data-bbox="804 1066 1043 1155">Presenza di linee di flusso evidenti sulla borchia del pezzo. IL MODELLO E' RITENUTO NON CONFORME.</p>

Tabella D.2.2: Scala di caratterizzazione visiva per la valutazione della presenza di linee di flusso

INDICE DEI TERMINI

Bastone:	Corpo di alimentazione principale durante la colata del grappolo. Funge anche da sostegno strutturale.
Campana di alimentazione:	Corpo tronco-conico in materiale refrattario che funge da punto di ingresso della lega in colata.
Distaffatura:	Eliminazione del guscio ceramico.
Estrattori:	Elementi cilindrici allungati con asse parallelo alla direzione di estrazione. In fase di apertura dello stampo distaccano il modello dal semi-stampo inferiore.
Formatura:	Fase di ricoprimento del grappolo con un guscio ceramico.
Giunto freddo:	Difettosità superficiale presente sui modelli in cera iniettati. Deriva dall'incontro senza unione di due fronti di cera.
Grappolo:	Unione tra i modelli in cera iniettati e un sostegno pre-costituito formato da bastone e runner.
LC55:	La pressa utilizzata per la sperimentazione.
Linee di flusso:	Difettosità lineari che si manifestano sui modelli in cera sotto forma di onde solidificate.
Montaggio:	Fase di assemblaggio dei grappoli.
Pattern:	Modello in cera.
Raddrizzatura:	Fase di rilevazione e sistemazione delle deformazioni non accettabili dei grezzi di fusione.
Raffreddante:	Tecnica finalizzata alla riduzione degli avvallamenti nei modelli in cera.
Runner:	Corpi secondari di alimentazione del grappolo.
Sbavatura:	Fase di eliminazione dell'attacco di colata dal grezzo di fusione.
Sottosquadro:	Geometria riproducibile da uno stampo solo tramite sistemi complessi (terza piastra, carrelli, anime.)
Terza piastra:	Elemento dello stampo che facilita l'uscita del modello in caso di sottosquadri o/e difficoltà di estrazione.
Troncatura:	Fase del processo in cui vengono separati i grezzi di fusione dal resto del grappolo.

ACRONIMI

ANOVA	ANalysis Of Variance
DOE	Design Of Experiment
HTC	Hard To Change
ETC	Easy To Change
WP	Whole Plot
SP	Sub Plot
CMM	Coordinate Measuring Machine
CP	Capacità di Processo

BIBLIOGRAFIA

- [1] Smart R.F. Beeley P.R. *Investment Casting*. The Institute of Materials, 1995.
- [2] *Blayson Technical advice*. URL: <https://www.blayson.com/downloads/technical-advice>.
- [3] Cacchi Pessani F. Bodini G. *Moulding Machines and Moulds for Plastics Processing*. Negri Bossi, 1988.
- [4] Cacchi Pessani F. Bodini G. Bodini R. *Presse e Stampi*. Negri Bossi, 1988.
- [5] Montgomery D.C. *Progettazione e Analisi degli Esperimenti*. McGraw-Hill, 2005.
- [6] Burbidge H.L. *Group Technology In The Engineering Industry*. MEP, 1990.
- [7] Mohren P. Manges G. *How to Make Injection Molds*. Hanser Publishers, 1986.
- [8] Sunpreet Singh Rupinder Singh. «Influence of process parameters on surface hardness, dimensional accuracy and surface roughness of investment cast components». In: *Journal of Mechanical Science and Technology* (2012).
- [9] PK Jha Sarojrani Pattnaik DB Karunakar. «Influence of injection process parameters on dimensional stability of wax patterns made by the lost wax process using Taguchi approach». In: *Journal of Materials: Design And Application* (2012).