UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Analisi dell'influenza della finitura superficiale dello stampo sulle forze di estrazione nel micro stampaggio a iniezione

Relatore: Prof. Ing. Giovanni Lucchetta

Correlatori: Dott. Marco Sorgato

Dott. Davide Masato

Laureando: Federico Vescovo

Matricola: 1057622

Anno Accademico 2014/2015

Abstract

Il microstampaggio a iniezione è una tecnologia usata per la replicazione di superfici funzionali micro strutturate. Una fase importante di questo processo è l'estrazione del componente dallo stampo. Durante questa fase è necessario vincere meccanicamente le forze di attrito che si generano durante il ritiro dimensionale del componente. E' possibile dunque che il componente si danneggi perdendo la propria funzionalità a causa di deformazioni o rotture. Questo aspetto è ancora più rilevante in presenza di microstrutture aventi geometrie con elevati rapporti tra le dimensioni principali come nel caso di dispositivi microfluidici. La ricerca nell'ambito del micro stampaggio ha assunto dunque anche una direzione volta all'indagine di quei parametri che hanno una maggiore influenza sulle forze di estrazione. Ridurre le forze di estrazione in maniera significativa garantisce inoltre una maggior integrità strutturale dello stampo. Nel caso di dispositivi microfluidici multistrato le forze di attrito sono influenzate sensibilmente dalla finitura superficiale dello stampo ottenuta mediante il processo di microfresatura. In questo lavoro è stato realizzato un apparato sperimentale con il quale analizzare l'influenza della finitura superficiale dello stampo sulle forze d'estrazione. Il sistema è stato progettato per essere montato su uno stampo modulare con il quale attrezzare una Battenfeld MicroPower 15. L'efficacia di questo apparato sperimentale ha permesso di valutare in via preliminare, mediante l'utilizzo di un piano fattoriale completo (DoE), il legame tra la finitura superficiale dello stampo e le forze di estrazione in relazione ai parametri di processo. La realizzazione degli inserti è stata effettuata tramite una microfresatrice di precisione al fine di poter controllarne la finitura superficiale. I risultati forniscono delle prime indicazioni utili alla definizione della finitura superficiale nel micro stampaggio a iniezione per componenti con elevati aspect ratio. Individuano inoltre le interazioni significative tra i parametri di processo e la rugosità superficiale.

Indice

Introduzione 13

Obiettivi del lavoro 17

Stato dell'Arte

1 Stampaggio a iniezione 21
1.1 Macchina per lo stampaggio a iniezione tradizionale 21
1.2 Fasi dello stampaggio a iniezione tradizionale 22
2 Micro Ingegneria 25
2.1 Progettazione di un prodotto 25
2.1.1 Approccio tradizionale 27
2.1.2 Concurrent Engineering 28
2.1.3 Confronto tra Approccio tradizionale e Concurrent Engineering 29
2.2 Progettazione di un micro componente 30
2.3 Tecnologie per la produzione di micro componenti 32
3 Microfresatura 33
4 Micro Stampaggio a Iniezione 35
4.1 Fasi del micro stampaggio a iniezione 35
4.2 Macchina per il micro stampaggio a iniezione 37
4.3 Scelta del Materiale 40
4.4 Parametri di processo 43
4.5 Forza di estrazione 45
4.5.1 Calcolo delle forze d'estrazione per geometrie semplici 46
4.5.2 Coefficiente d'attrito 48
4.5.3 Replicazione della superficie dello stampo 49
4.5.4 Misura del coefficiente d'attrito 51
4.5.5 Influenza dei parametri di processo sulla forza d'estrazione 53

Materiali e Metodi

5 Programmazione Degli Esperimenti 59
5.1 Esperimenti fattoriali 61

5.1.1 Piano 2^2 61
5.1.2 Piano 2^k con $k \geq 3$ 63
5.2 Analisi della varianza 65
5.2.1 Determinazione dei test statistici 67
5.2.2 Verifica dell'ipotesi nulla 70
5.2.3 Verifica delle ipotesi sul modello 71
5.3 Analisi della varianza per un esperimento fattoriale 72
5.3.1 Determinazione dei test statistici per un piano fattoriale 73
5.3.2 Verifica dell'ipotesi nulla per un piano fattoriale 74
6 Progettazione dello stampo 77
6.1 Stampo 77
6.2 Inserto 78
6.2.1 Definizione della geometria della cavità 79
6.2.2 Simulazioni Moldflow 81
6.2.3 Stima della forza di estrazione 91
6.2.4 Lavorabilità dell'inserto alle macchine utensili 93
6.2.5 Dimensioni finali della cavità dell'inserto 97
6.2.6 Caratterizzazione delle superfici degli inserti 98
6.3 Estrattore 100
6.3.1 Simulazioni ANSYS 101
6.3.2 Lavorabilità dell'estrattore alle macchine utensili 104
6.3.3 Dimensioni finali dell'estrattore 105
7 Acquisizione dei dati 107

Analisi sperimentale

8 Prove sperimentali 113
8.1 Risultati sperimentali 115
8.2 Elaborazione dei risultati sperimentali 116
8.3 Discussione dei risultati sperimentali 120

Conclusioni

9 Conclusioni 127

Indice delle Figure

Figura 0.1 Micro valvola pneumatica 14
Figura 0.2 Dispositivo microfluidico sviluppato al laboratorio TE.SI. 14
Figura 0.3 Rottura del chip dovuta alle forze d'attrito eccessive 15
Figura 1.1 Unità fondamentali di una macchina per lo stampaggio a iniezione tradizionale [6] . 22
Figura 1.2 Fasi di un ciclo di stampaggio a iniezione tradizionale [6] 23
Figura 2.1 Ciclo di vita di un prodotto generico 26
Figura 2.2 Progettazione di un prodotto con approccio tradizionale 27
Figura 2.3 Progettazione di un prodotto mediante Concurrent Engineering 28
Figura 2.4 Rappresentazione dell'utilizzo di software durante il ciclo di vita di un prodotto 29
Figura 2.5 Confronto tra costi attivati e costi decisi 30
Figura 2.6 Progettazione di un micro componete [7] 31
Figura 3.1 Realizzazione di un pin mediante micro fresatura [9] 33
Figura 3.2 Effetti dei principali parametri della micro fresatura sulla qualità del prodotto [9] 34
Figura 4.1 Fasi di un ciclo di micro stampaggio a iniezione [11] 37
Figura 4.2 Wittmann Battenfeld MicroPower 15t 38
Figura 4.3 Vista in sezione di una Wittmann Battenfeld MicroPower 15t [12] 38
Figura 4.4 Curve isocrone e isometriche di un Polipropilene [13] 40
Figura 4.5 Curve di viscosità del PS 1541 Total 41
Figura 4.6 Equazione di Cross 42
Figura 4.7 Ritiro volumetrico per differenti materiali polimerici [6] 42
Figura 4.8 Curve Pvt del PS 1541 Total 43
Figura 4.9 Effetto dell'angolo di sformo sulle forze d'estrazione [25] 45
Figura 4.10 Notazioni per la stima della forza d'attrito nel caso di un elemento cilindrico [25] .. 46
Figura 4.11 Deformazione delle asperità di un componente durante l'estrazione [27] 48
Figura 4.12 Solcatura di un componente durante l'estrazione [27] 49
Figura 4.13 Adesione del componente allo stampo durante l'estrazione [27] 49
Figura 4.14 Replicazione della superficie dello stampo [30] 50
Figura 4.15 Fattori che influenzano l'estrazione nel micro stampaggio a iniezione [30] 50
Figura 4.16 Macchina per la determinazione del coefficiente d'attrito [26] 51
Figura 4.17 Andamento della forza d'estrazione al variare della rugosità per il PP [33] 54
Figura 4.18 Andamento della forza d'estrazione al variare della rugosità per il PET [33] 55
Figura 4.19 Andamento della forza d'estrazione al variare della rugosità per il PMMA [33] 55
Figura 5.1 Rappresentazione generale di un processo [35] 59
Figura 5.2 Rappresentazione grafica di un piano fattoriale 2^2 [35] 61
Figura 5.3 Grafici delle variazioni di risposta [35] 62

Figura 5.4 Rappresentazione grafica del metodo "prove ed errori" [35] 63
Figura 5.5 Rappresentazione grafica di un piano fattoriale 2^3 [35] 64
Figura 5.6 Rappresentazione geometrica dei contrasti di un piano fattoriale 2^3 [35] 64
Figura 5.7 Matrice dei segni di un piano fattoriale 2^3 per il calcolo dei contrasti [35] 65
Figura 5.8 Distribuzione dei test statistici e significatività [35] 71
Figura 5.9 Grafico di probabilità normale dei residui [35] 72
Figura 5.10 Grafico dei residui per ogni livello di un generico fattore [35] 72
Figura 6.1 Carrello estrattori con relativa sezione 77
Figura 6.2 Stampo utilizzato in questo lavoro 78
Figura 6.3 Lato superiore dell'inserto 80
Figura 6.4 Lato inferiore dell'inserto 80
Figura 6.5 Mesh del componente 85
Figura 6.6 Fronte di flusso durante la simulazione di riempimento del componente 86
Figura 6.7 Analisi delle deformazioni del componente. Caso 1 87
Figura 6.8 Analisi delle deformazioni del componente. Caso 2 88
Figura 6.9 Ritiro volumetrico del componente. Caso 1 88
Figura 6.10 Andamento del ritiro volumetrico lungo l'altezza dei pin sulla superficie interna 89
Figura 6.11 Andamento del ritiro volumetrico lungo la circonferenza interna dei pin 90
Figura 6.12 Andamento del ritiro volumetrico in direzione radiale 90
Figura 6.13 Utensile utilizzato per la lavorazione degli inserti 94
Figura 6.14 Fase della generazione del percorso utensile con un software CAM 95
Figura 6.15 Inserto in AISI 420 96
Figura 6.16 Usura dell'utensile dopo la lavorazione dei due inserti 96
Figura 6.17 Disegno tecnico della cavità 97
Figura 6.18 Riempimento della cavità con gomma siliconica 98
Figura 6.19 Replica della cavità 98
Figura 6.20 Superficie interna dei fori della replica per la misura della rugosità 99
Figura 6.21 Confronto tra tecniche dirette ed indirette di misura delle superfici 99
Figura 6.22 Misura 3D della superficie dei pin mediante tecnica di replicazione 100
Figura 6.23 Modello CAD dell'estrattore [6.23] 101
Figura 6.24 Vincoli sugli spostamenti nella simulazione in Ansys 102
Figura 6.25 Applicazione delle forze d'estrazione nella simulazione in Ansys 102
Figura 6.26 Distribuzione delle tensioni nel caso di estrattore con 4 pin 103
Figura 6.27 Distribuzione delle tensioni nel caso di estrattore con 5 pin 104
Figura 6.28 Estrattore in AISI 02 106
Figura 6.29 Particolare dell'assieme: accoppiamento inserto-estrattore 106
Figura 7.1 Sensore piezoelettrico Kistler 9223A 107
Figura 7.2 Scheda tecnica del Sensore piezoelettrico Kistler 9223A 107

Figura 7.3 Sistema di misura della forza d'estrazione 108
Figura 7.4 Modello CAD del sistema di misura della forza d'estrazione 108
Figura 7.5 Interruttore per l'acquisizione dei dati 109
Figura 7.6 Schermata di acquisizione dati del software LabView® 110
Figura 8.1 Andamento della forza d'estrazione 114
Figura 8.2 Confronto tra forza a secco e forza totale 118
Figura 8.3 Effetti principali 120
Figura 8.4 Interazioni tra i fattori 121

Indice delle Tabelle

Tabella 2.1 Tecnologie per la produzione di micro componenti 32
Tabella 4.1 Dati tecnici di una Wittmann Battenfeld MicroPower 15t 39
Tabella 5.1 Formule per il calcolo degli effetti in un generico piano fattoriale 2^k [35] 65
Tabella 5.2 Grandezze necessarie per l'analisi della varianza [35] 70
Tabella 5.3 Formule per il calcolo delle somme dei quadrati [35] 70
Tabella 5.4 Relazione per la verifica dell'ipotesi nulla mediante F_0 [35] 70
Tabella 5.5 Relazione per la verifica dell'ipotesi nulla mediante P_0 [35] 71
Tabella 5.6 Grandezze necessarie per l'analisi della varianza di un piano fattoriale 2^3 [35] 74
Tabella 5.7 Relazioni per la verifica dell'ipotesi nulla mediante F_0 [35] 74
Tabella 6.1 Parametri principali della mesh 85
Tabella 6.2 Valori del ritiro volumetrico misurati lungo l'altezza dei pin 89
Tabella 6.3 Valori del ritiro volumetrico misurati lungo l'altezza dei pin 91
Tabella 6.4 Parametri per la stima della forze di estrazione (Total PS 1541) 92
Tabella 6.5 Utensili disponibili per la sgrossatura 94
Tabella 6.6 Parametri di processo utilizzati per la realizzazione degli inserti 95
Tabella 6.7 Dimensioni principali della cavità degli inserti 97
Tabella 6.8 Rugosità degli inserti 100
Tabella 6.9 Caratteristiche principali dell' estrattore 105
Tabella 8.1 Livelli dei fattori utilizzati nelle prove sperimentali (DoE) 114
Tabella 8.2 Valori di forza d'estrazione misurati 116
Tabella 8.3 Forza totale media e deviazione standard dei dati acquisiti 117
Tabella 8.4 Forza e deviazioni standard delle prove a secco 118
Tabella 8.5 Forza netta misurata 120
Tabella 8.6 P-value degli effetti principali e delle interazioni 122

Introduzione

Il micro stampaggio a iniezione è diventato negli ultimi anni uno dei processi tecnologici più importanti per la produzione di dispositivi microfluidici. Questa tecnologia permette infatti la produzione di componenti su larga scala essendo un processo altamente automatizzato. Nel laboratorio TE.SI. dell'Università di Padova è stato realizzato un dispositivo microfluidico multistrato per analisi biomedicali come ad esempio il sequenziamento del DNA [1] o reazioni a catena della polimerasi (PCR) [2]. Inizialmente questi dispositivi erano realizzati in silicone o vetro mediante fotolitografia e dissoluzione a secco o a umido. Il vetro è infatti il materiale ideale per applicazioni biomedicali grazie alla sua elevata biocompatibilità. Anche i materiali polimerici sono però biocompatibili con l'ulteriore vantaggio di essere facilmente processabili. I materiali utilizzati per la realizzazione di dispositivi microfluidici mediante micro stampaggio a iniezione sono principalmente il COC [3], il PMMA [4] e il PC [5]. Anche il PS può essere utilizzato essendo un materiale adatto per applicazioni biomedicali.

La struttura del dispositivo sviluppato al laboratorio TE.SI. è formata da tre elementi principali:

1. *Strato di controllo*: questo strato è costituito da una sola superficie funzionale sulla quale sono presenti dei micro canali che formano una complessa struttura 2.5 D. I micro canali servono ad attivare le valvole di controllo dello strato funzionale durante le analisi;

2. *Strato funzionale*: questo strato è costituito da due superfici funzionali. Sulla superficie superiore sono presenti dei micro canali che formano una struttura 3D mentre sulla superficie inferiore sono presenti le camere per le analisi del fluido vettore. Le due superfici

sono collegate da piccoli fori per il passaggio del fluido vettore da un lato all'altro;

3. *Membrana di chiusura*: la membrana è costituita da un sottile strato di PDMS che permette l'attivazione delle valvole.

I due strati sono accoppiati uno sull'altro in modo che le due superfici dove sono presenti i micro canali siano rivolte dallo stesso lato. I canali dello strato di controllo sono ortogonali ai canali dello strato attivo. La membrana in PDMS è posta tra i due strati. In questo modo quando nei canali di controllo viene fatta circolare aria compressa la membrana si deforma andando a chiudere i canali dello strato attivo (fig. [0.1]).

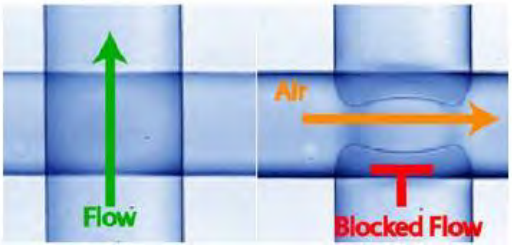

Figura 0.1 Micro valvola pneumatica

In fig. [0.2] è raffigurato il dispositivo microfluidico completo.

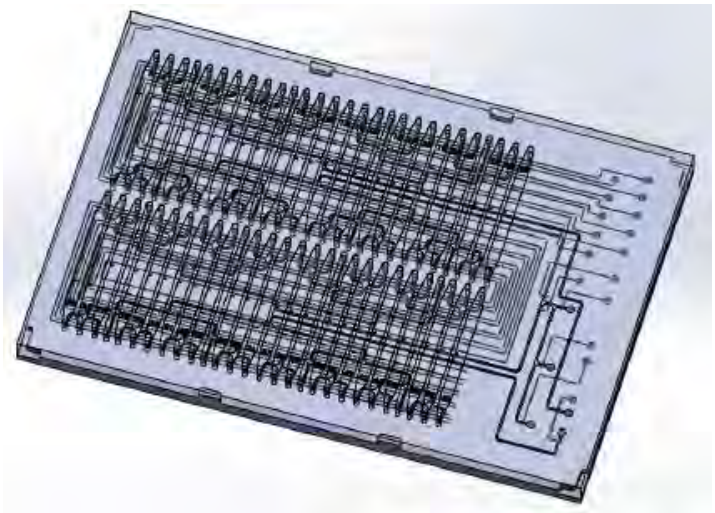

Figura 0.2 Dispositivo microfluidico sviluppato al laboratorio TE.SI.

Il materiale utilizzato per la realizzazione dei due strati del chip è il COC. Infatti oltre ad avere le proprietà ottiche richieste per l'esecuzione di analisi biologiche garantisce anche ottime proprietà di adesione con la membrana di PDMS fornendo così un'ottima tenuta al sistema.

La fase di realizzazione dei dispositivi ha messo in evidenza un problema durante la fase d'estrazione. E' stato verificato infatti che il processo riesce a garantire un'ottima replicazione dei canali, ma la loro integrità è compromessa dalla fase di estrazione durante la quale lo strato funzionale si deforma o si rompe. La progettazione del dispositivo microfluidico ha portato ad avere una disposizione molto ravvicinata delle camere per l'analisi del fluido vettore nello strato funzionale, costringendo il posizionamento degli estrattori lungo la zona perimetrale. La presenza di fori ad elevato aspect ratio fa si che le forze d'attrito che si sviluppano durante la fase di raffreddamento in seguito al ritiro volumetrico siano elevate. Di conseguenza le tensioni che si generano a causa delle forze applicate dagli estrattori nelle zone adiacenti ai fori per permettere l'estrazione del dispositivo dallo stampo, sono sufficienti per la rottura del componente (fig. [0.3]).

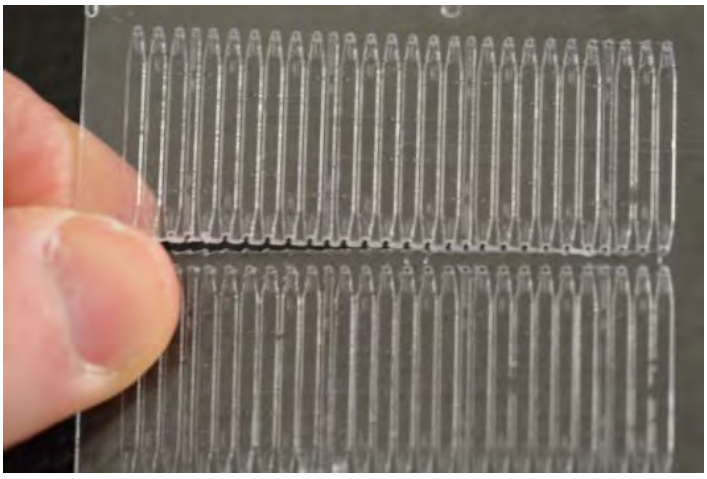

Figura 0.3 Rottura del chip dovuta alle forze d'attrito eccessive

Questo aspetto ha contribuito ad intraprendere uno studio sulle forze d'estrazione per determinare quali siano i parametri che maggiormente influenzano questa fase del processo. Un'attenta revisione della letteratura ha portato ad individuare come parametro tecnologico di realizzazione degli stampi di maggior interesse la rugosità superficiale della cavità. Inoltre alcuni parametri di processo del micro stampaggio a iniezione hanno una interazione con la rugosità superficiale dello stampo. Per poter effettuare una analisi adeguata si è deciso in questo lavoro di realizzare un inserto in grado di replicare la criticità del fenomeno fisico, da utilizzare in uno stampo modulare con il quale è attrezzata una Battenfeld MicroPower 15. La cavità realizzata è costituita da quattro pin ravvicinati mentre il sistema di estrazione è formato da un unico estrattore lavorato in testa per avere cinque pin che imprimono durante la fase di estrazione una forza equamente distribuita sulle superfici della cavità dove il pezzo ritira. La geometria infatti è stata pensata per poter misurare l'effettiva influenza della rugosità superficiale senza introdurre altri fattori. Inoltre la geometria è in grado di essere lavorata per microfresatura in modo tale da poter confrontare differenti finiture superficiali. Si è deciso inizialmente di lavorare la cavità in modo da ottenere due rugosità completamente differenti per non incorrere in problemi di misurazione dato che le variazioni attese di forza d'estrazione sono piccole. I parametri di processo sono stati determinati attraverso uno studio del fenomeno descritto in letteratura. I livelli di tali fattori sono stati stabiliti successivamente alla verifica della sensibilità del sistema di misurazione della forza. La forza è stata misurata attraverso un sensore piezoelettrico montato sul sistema di movimentazione del carrello estrattori. Le prove sono state eseguite mediante programmazione degli sperimenti (DoE). I dati così raccolti sono stati analizzati mediante analisi della varianza.

Obiettivi del lavoro

Gli obiettivi del lavoro sono i seguenti:

1. Realizzare un apparato sperimentale per analizzare l'influenza della finitura superficiale dello stampo sulle forze d'estrazione di componenti con geometrie ad elevati aspect ratio realizzati mediante il processo di micro stampaggio a iniezione (ad es. dispositivi microfluidici). Questo obiettivo prevede la progettazione degli inserti di uno stampo, cavità e sistema d'estrazione, oltre che l'individuazione di un sistema di misura adeguato e della sua installazione.

2. Esecuzione di una campagna prove definita mediante la metodologia della programmazione degli esperimenti (DoE) per individuare i parametri che influenzano la forza d'estrazione in relazione alla finitura dello stampo. Per poter ridurre la forza d'estrazione è infatti necessario conoscere l'interazione tra la finitura superficiale e i parametri di processo del micro stampaggio a iniezione.

Parte I

Stato dell'Arte

1 Stampaggio a iniezione

Lo stampaggio a iniezione è il processo più diffuso per la produzione di componenti in materiale polimerico. Costituisce infatti quasi un terzo della produzione mondiale di materiali termoplastici [6]. Il motivo di questa ampia diffusione è la relativa semplicità del processo e la sua predisposizione alla produzione su larga scala dovuta all'elevata automazione e ai ridotti tempi ciclo. Inoltre i componenti realizzati mediante stampaggio a iniezione hanno buone tolleranze dimensionali e spesso non necessitano di ulteriori lavorazioni meccaniche di finitura.

1.1 Macchina per lo stampaggio a iniezione tradizionale

Una macchina per lo stampaggio a iniezione tradizionale è composta dalle seguenti unità [6]:

1. *Unità plasticizzante e di iniezione*: gli scopi principali di questa unità sono quelli di fondere il polimero, di accumularlo nella zona frontale della vite, di iniettarlo nella cavità e di mantenere la pressione durante il raffreddamento.

2. *Unità di chiusura:* il suo scopo è aprire e chiudere lo stampo. Durante la fase di riempimento, quando lo stampo è chiuso, deve assicurare un forza sufficiente ad evitare la formazione di bava. Esistono due tipi di azionamento dell'unità di chiusura: meccanica o idraulica.

3. *Cavità dello stampo*: gli scopi principali di uno stampo sono quelli di distribuire il polimero fuso nella cavità, conferirgli la forma, raffreddare il componente e rimuoverlo dalla cavità.

In fig. [1.1] sono rappresentate le tre unità fondamentali di una pressa per lo stampaggio a iniezione.

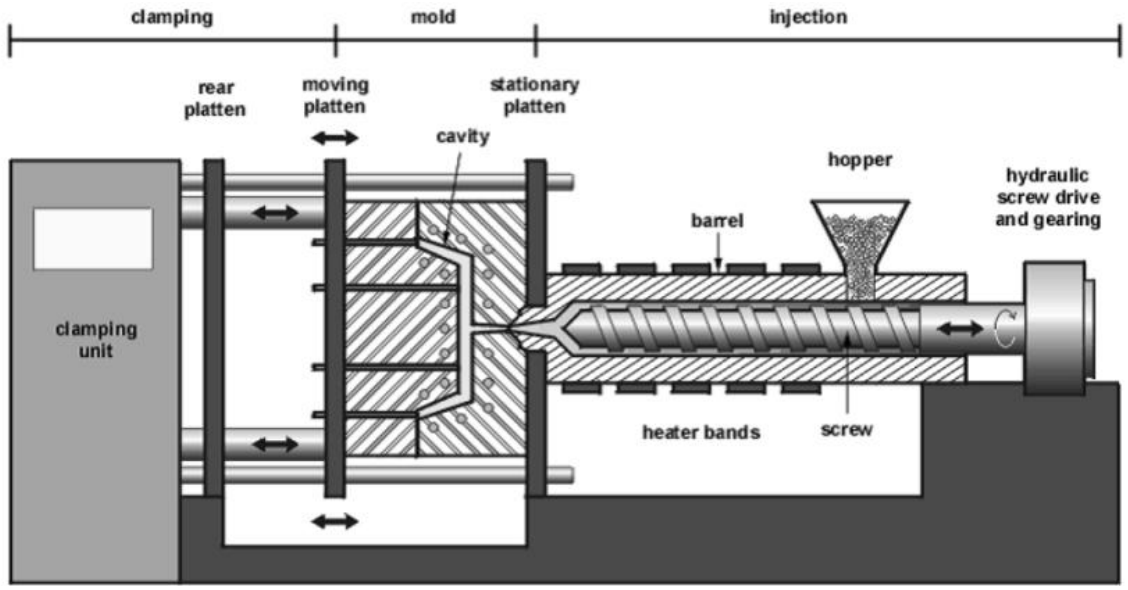

Figura 1.1 Unità fondamentali di una macchina per lo stampaggio a iniezione tradizionale [6]

1.2 Fasi dello stampaggio a iniezione tradizionale

Le fasi che costituiscono il processo di stampaggio a iniezione sono [6]:

1. *Plastificazione*: l'elemento principale dell'unità plasticizzante e di iniezione è la vite. Per svolgere le funzioni sopra citate è dotata di due movimenti: rotazionale e trasversale. Per questo motivo si definisce *vite pistonante*. Attraverso il moto rotazionale il polimero viene fuso e accumulato nella zona frontale della vite. Infatti il materiale, a causa delle forze d'attrito generate dal contatto con la superficie del canale, ha un moto elicoidale che gli permette di avanzare. Durante l'avanzamento, a causa della riduzione della profondità del canale, il materiale è sottoposto ad una azione meccanica di compressione che lo porta a fusione. La fusione è aiutata anche dal calore fornito dalle resistenze termiche poste esternamente alla camicia della vite;

2. *Iniezione:* durante questa fase lo stampo si chiude e successivamente il materiale viene iniettato grazie al movimento trasversale della vite. Il materiale riempie la cavità e a contatto con le superfici dello stampo inizia a formare una sottile pellicola solida;

3. *Impaccamento:* al punto di switch-over (generalmente al 99% di riempimento della cavità) la vite inizia ad applicare la pressione di impaccamento. Viene iniettato altro materiale a pressione costante per compensare il ritiro del materiale che avviene a causa del raffreddamento del polimero. Questa fase continua fino a quando il gate non è completamente congelato. E' una fase molto importante del processo in quanto influenza sensibilmente le deformazioni del componente e dunque la sua funzionalità;

4. *Raffreddamento:* questa fase comprende anche la fase precedente di impaccamento come già anticipato ma si protrae fino a quando il punto più caldo del componente raggiunge la temperatura di estrazione. Questa è tale da permettere di estrarre il componente senza danneggiarlo e di garantire contemporaneamente tempi ciclo brevi. Durante questa fase la vite arretra ed inizia a plastificare altro materiale;

5. *Estrazione:* quando il pezzo si è raffreddato completamente lo stampo si apre e viene azionato il carrello estrattori. Il pezzo è forzato a staccarsi dallo stampo mediante un'azione meccanica.

La somma dei tempi delle singole fasi costituisce il tempo ciclo dell'intero processo. Una suddivisione di questi tempi è mostrata in fig. [1.2].

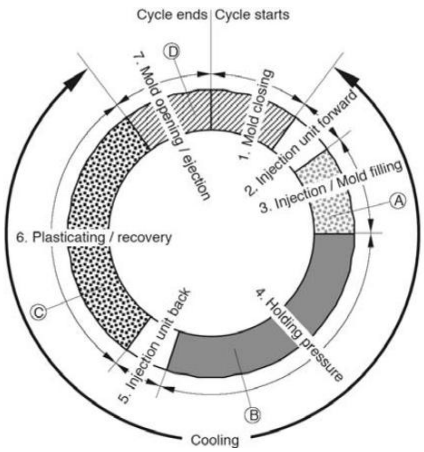

Figura 1.2 Fasi di un ciclo di stampaggio a iniezione tradizionale [6]

2 Micro Ingegneria

La crescente richiesta di micro componenti che si è verificata negli ultimi 10 anni ha portato allo sviluppo di nuove tecnologie manifatturiere. Un micro componente è un oggetto caratterizzato da un elevato grado di integrazione di funzionalità e da strutture aventi almeno una dimensione nell'ordine dei μm [7]. Queste tecnologie devono dunque essere in grado produrre oggetti di ridotte dimensioni e aventi tolleranze dimensionali strette. Inoltre devono essere in grado di garantire produzioni di larga scala per soddisfare le esigenze del mercato. Attualmente sono disponibili una grande quantità di tecnologie produttive per la realizzazione di microcomponenti tra cui la micro elettroerosione, la micro fresatura, la sinterizzazione, la stereolitografia, etc. I principi fisici sui cui si basano queste tecnologie sono di natura meccanica, termica, chimica ed elettrica. La tecnologia con cui realizzare un micro componente è generalmente scelta in funzione del materiale e delle caratteristiche geometriche e dimensionali attribuite in fase di progettazione. Recentemente il micro stampaggio a iniezione ha avuto una grande diffusione in quanto adatto alla produzione di componenti su larga scala. E' infatti un processo a basso costo energetico e produttivo. Inoltre i materiali polimerici, oltre ad essere isolanti termici ed elettrici, sono biocompatibili. Sono utilizzati anche per ridurre drasticamente il peso dei componenti. I settori che hanno contribuito maggiormente allo sviluppo di nuove tecnologie produttive sono:

- Medico (ad es. stents coronarici);
- Biomedico (ad es. labs on a chip);
- Elettronico (ad es. micro interruttori);
- Automobilistico (ad es. sensori di movimento).

2.1 Progettazione di un prodotto

Il ciclo di vita di un prodotto generico è illustrato in fig. [2.1].

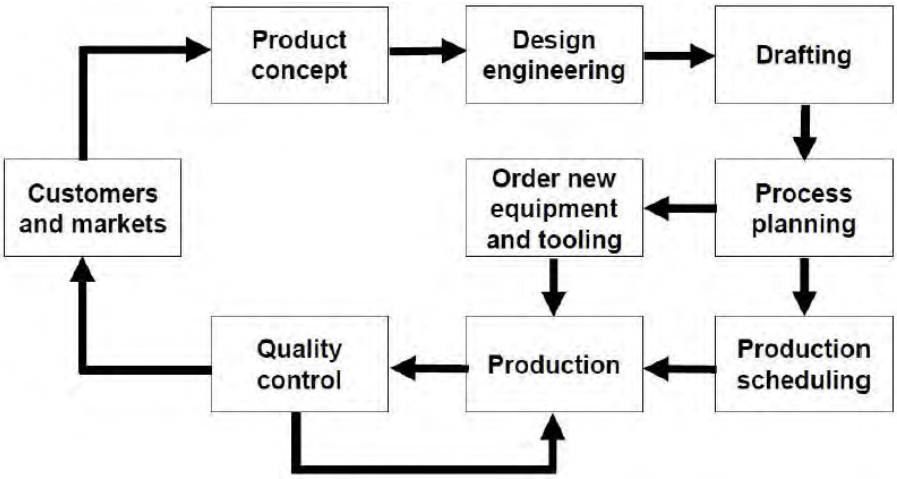

Figura 2.1 Ciclo di vita di un prodotto generico

La necessità di sviluppare un prodotto nasce da un esigenza di mercato. L'indagine di mercato è dunque una fase fondamentale in quanto definisce le caratteristiche generali del prodotto che saranno sviluppate in seguito. Dalle caratteristiche generali, funzionali ed estetiche, si passa alla progettazione di massima del prodotto. Questa fase consiste nella realizzazione di un *concept,* ovvero di un disegno del prodotto di carattere generale in cui vengono illustrati approssimativamente il principio di funzionamento e la forma. Viene anche ipotizzato il processo che meglio si presta alla realizzazione di un tale componente. Successivamente vi è la fase di ingegnerizzazione. Questa consiste nell'analisi di vari aspetti del prodotto e del processo al fine di determinare le specifiche progettuali. Le analisi che vengono eseguite sono in relazione al tipo di oggetto e all'utilizzazione. Le più ricorrenti sono di tipo economico (stima dei costi), strutturale, dinamiche e di fattibilità realizzativa. La fase di pianificazione che segue è la prima fase del processo realizzativo. In questa vengono specificate le sequenze operative e le attrezzature necessarie alla produzione dell'oggetto. Terminata la pianificazione del processo si passa alla schedulazione, ovvero alla programmazione della produzione. Questa fase prevede dunque l'attribuzione delle singole attività alle macchine in relazione alla loro capacità. Da questa operazione si generano i fabbisogni di risorse che generalmente vengono gestiti tramite MRP. La fase di produzione del componente può ora cominciare. La materia prima viene trasformata mediante

processi che gli conferiscono valore aggiunto fino all'ottenimento del prodotto finale. Generalmente dalla produzione vengono estratti dei campioni per effettuare controlli statistici. Mediante questi viene stabilito se il processo è in controllo, ovvero se è affetto solo da variabili non casuali (fattori di rumore). In questo caso i pezzi hanno valori della grandezza di controllo entro i limiti di tolleranza imposti. Questa fase permette dunque di scartare i pezzi difettosi e di intervenire tempestivamente sul processo in caso di instabilità. Il ciclo di vita termina con l'acquisto del prodotto da parte del cliente che ne aveva stabilito indirettamente le caratteristiche generali. E' dunque un ciclo chiuso.

Consideriamo ora nel dettaglio la fase di ingegnerizzazione del prodotto. Questa può essere svolta secondo due approcci.

2.1.1 Approccio tradizionale

La fase di ingegnerizzazione si colloca immediatamente dopo la fase di ideazione del concept. Le caratteristiche generali del prodotto sono dunque già state stabilite ma necessitano di essere ottimizzate in relazione alle sue funzionalità. L'approccio tradizionale prevede lo svolgimento di tutte le attività ingegneristiche in modo sequenziale. Si tratta dunque di una metodologia che richiede tempi lunghi e che non integra tutti gli aspetti del prodotto rendendo così difficile l'ottenimento di una soluzione ottimale.

La sequenza di azioni che vengono svolte durante la progettazione di un prodotto secondo l'approccio tradizionale è illustrata in fig. [2.2].

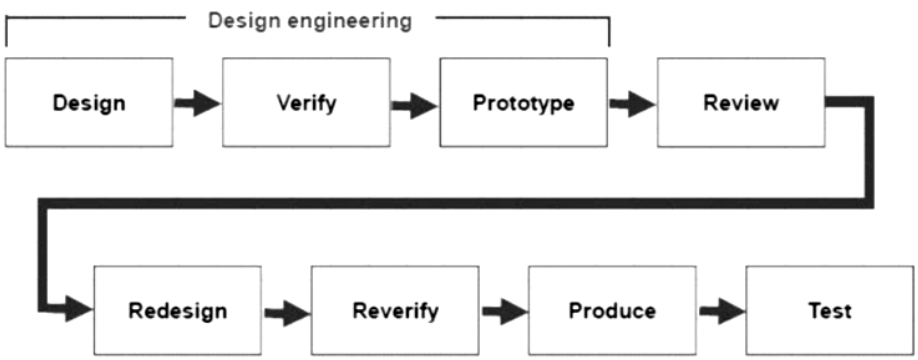

Figura 2.2 Progettazione di un prodotto con approccio tradizionale

La fase di progettazione prevede una prima verifica per acconsentire il passaggio alla fase di prototipizzazione. Solamente sul prototipo vengono realizzate le prove di fattibilità realizzativa, di qualità, e di funzionamento. A queste verifiche segue la riprogettazione del componente sulla base delle informazioni raccolte. Il componente riprogettato viene poi verificato nuovamente prima di essere prodotto.

2.1.2 Concurrent Engineering

A differenza dell'approccio tradizionale la progettazione mediante Concurrent Engineering (progettazione integrata) prevede uno sviluppo in parallelo degli aspetti fondamentali del prodotto sia in termini di funzionalità che in termini di realizzabilità (fig.[2.3]).

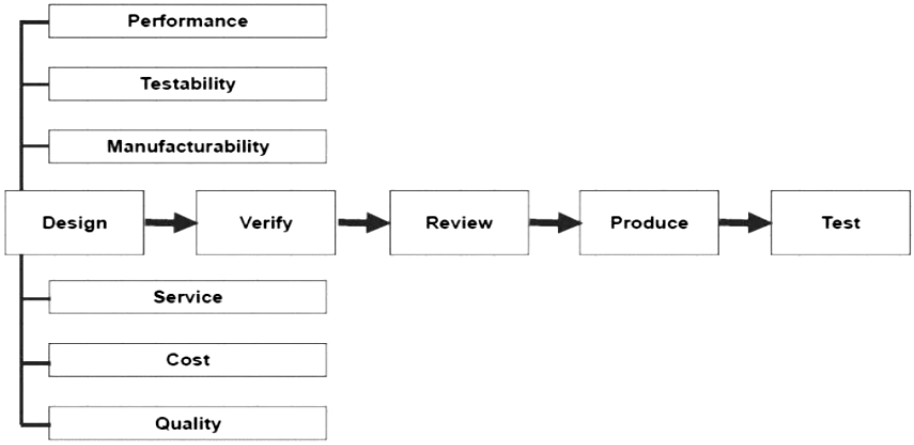

Figura 2.3 Progettazione di un prodotto mediante Concurrent Engineering

L'approccio di realizzazione di un prodotto mediante Concurrent Engineering è dunque iterativo in quanto le funzionalità, le specifiche e le tolleranze sono strettamente collegate al processo con il quale viene realizzato il prodotto. La scelta del processo è inoltre influenzata da altri vincoli come la processabilità di un determinato materiale. Tutte le modifiche a ciascuno di questi aspetti fondamentali del prodotto comportano dei cambiamenti che in questo caso vengono gestiti nella prima fase di ingegnerizzazione. Spesso il Concurrent Engineering prevede la scelta di una determinata strategia di progettazione in modo da ottenere un prodotto ottimale. Queste strategie vengono indicate

generalmente con la sigla DFX (Design of X), dove la lettera X può stare per Manufacturing, Assembly o Environment. La progettazione mediante Concurrent Engineering prevede inoltre un utilizzo considerevole di software per la progettazione, come CAD, FEM, CFD (fig. [2.4]). Questi infatti permettono di apportare velocemente modifiche e di simulare il prodotto ed il processo prevenendo l'apporto di correzioni nelle fasi successive evitando un aumento dei costi e dei tempi. Inoltre permettono una gestione semplificata dei flussi di informazioni favorendo l'integrazione di tutti gli aspetti progettuali.

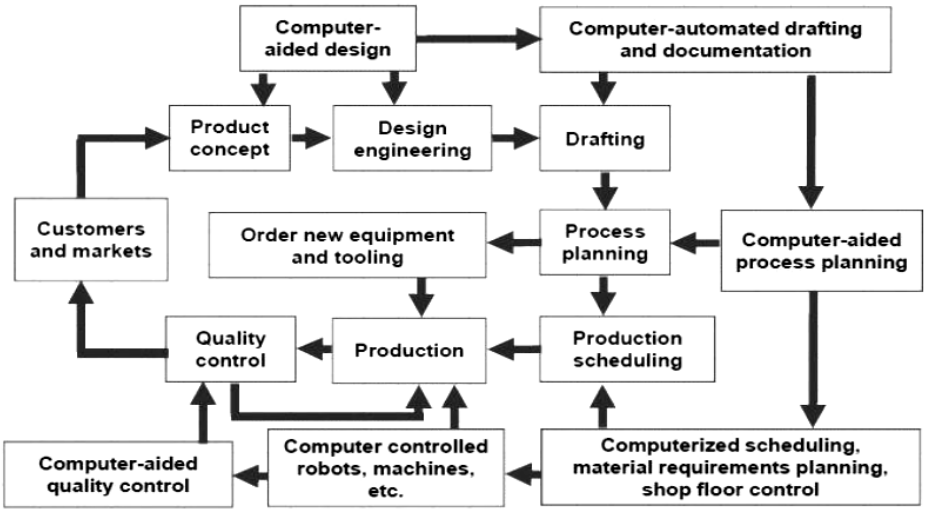

Figura 2.4 Rappresentazione dell'utilizzo di software durante il ciclo di vita di un prodotto

2.1.3 Confronto tra Approccio tradizionale e Concurrent Engineering

E' immediatamente intuibile come il *Concurrent Engineering* comporti una riduzione dei costi di progettazione, una riduzione dei tempi di sviluppo (con la possibilità di poter rispondere meglio alle frequenti variazioni delle esigenze di mercato) e un miglioramento della qualità del prodotto. A causa delle interazioni fra tutti gli aspetti del prodotto e del processo la fase di ingegnerizzazione può risultare complessa e lunga. Il maggior tempo impiegato in questa fase viene recuperato successivamente. Con questa metodologia infatti non si verifica più nelle fasi successive la necessità di apportare ulteriori modifiche alle caratteristiche del prodotto per rimediare agli inconvenienti che si presentano

non avendo considerato alcuni aspetti progettuali. I cambiamenti che vengono fatti nella fase iniziale di sviluppo sono essenziali per la definizione ottimale del prodotto e del processo. Questi cambiamenti sono accompagnati dall'attivazione di costi decisionali che determinano circa l'80% dei costi totali del prodotto come mostrato in fig. [2.5]. E' infatti nella prima fase di progettazione del prodotto che vengono stabilite la complessità del componente e la tecnologia di produzione.

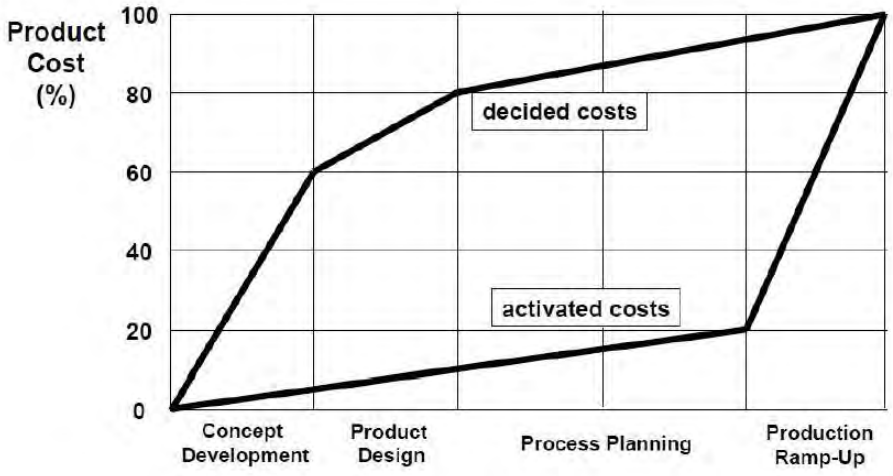

Figura 2.5 Confronto tra costi attivati e costi decisi

Appare evidente il vantaggio di utilizzare l'approccio del Concurrent Engineering in quanto l'apporto di modifiche nella fase di produzione comporta un aumento dei costi notevole. Inoltre è possibile valutare nella fase di progettazione varie alternative ed ottimizzare le scelte fatte mediante l'uso di software di progettazione.

2.2 Progettazione di un micro componente

La progettazione di un micro componente non può dunque prescindere dall'approccio del Concurrent Engineering data la grande integrazione con i processi realizzativi e con altri componenti. Nello specifico è possibile suddividere il prodotto in 4 livelli [7]: sistema completo, funzionalità dei singoli componenti, comportamento fisico dei singoli componenti e processo produttivo (fig. [2.6]).

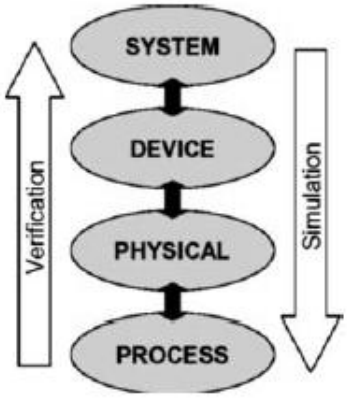

Figura 2.6 Progettazione di un micro componete [7]

Alla base di questa di questo approccio c'è la definizione del processo, ovvero la scelta della tecnologia realizzativa e la determinazione della sequenza di operazioni necessarie per l'ottenimento del prodotto. Infatti in tutte le micro tecnologie manifatturiere la sequenza delle operazioni e le condizioni di processo influenzano le prestazioni e la qualità del componente. In questa fase viene realizzata la geometria del prodotto mediante l'utilizzo di software CAD, compatibilmente con le caratteristiche di funzionamento della tecnologia realizzativa. Inoltre la realizzazione del componente può essere simulata mediante l'utilizzo di software che implementano le equazioni differenziali che regolano il processo (ad es. il software Autodesk Moldflow Synergy® permette di simulare le fasi di riempimento, impaccamento e raffreddamento nel processo di stampaggio a iniezione). Questa fase permette di ottimizzare la geometria del prodotto in funzione del processo realizzativo. Successivamente si verifica il comportamento fisico dei componenti. In questa fase si eseguono ad esempio verifiche strutturali o termiche. Completata questa operazione, se non sono state riscontrate modifiche da apportare, si procede con la verifica delle funzionalità del componente e della loro influenza sul sistema completo. In queste fasi si analizzano cioè le funzionalità del componente prima in senso assoluto e poi in relazione agli altri componenti del sistema con i quali vi è interazione. Si tratta dunque di un processo iterativo in termini di simulazioni e verifiche di funzionalità e di fattibilità produttiva. Quando infatti viene stabilita

una modifica al componente è necessario effettuare nuovamente i passaggi a valle dell'iter progettuale per l'accettazione del componente.

2.3 Tecnologie per la produzione di micro componenti

Le tecnologie per la produzione di microcomponenti sono svariate ma non possono essere utilizzate indifferentemente in quanto sono applicabili solo a determinati materiali e in relazione alle funzionalità e alle tolleranze di progetto. I materiali utilizzati per la produzione di micro componenti sono: polimeri, metalli e ceramici. Nella tab. [2.1] sono riportate le principali tecnologie realizzative di micro componenti [8].

Tipologia di processo	Processo
Processi sottrattivi	Micro fresatura, micro tornitura, micro EDM.
Processi additivi	Rivestimenti superficiali (CVD, PVD), micro stampaggio a iniezione, sinterizzazione, stereolitografia.
Processi per deformazione	Micro formatura (stampaggio, estrusione, piegatura, forgiatura, imbutitura, idroformatura).
Processi di giunzione	Micro assemblaggio meccanico, saldatura laser, saldatura a resistenza, incollaggio.
Processi ibridi	LIGA, sovra iniezione.

Tabella 2.1 Tecnologie per la produzione di micro componenti

3 Microfresatura

La micro fresatura è un processo ampiamente impiegato per la produzione di micro componenti di forma complessa. Il principio fisico su cui si basa è l'asportazione meccanica di materiale attraverso utensili di varie forme caratterizzati da elevata durezza. Questo processo è utilizzato inoltre per la realizzazione di stampi che vengono impiegati nel micro stampaggio a iniezione. In questa applicazione è molto frequente la presenza di elementi ad elevato aspect ratio (rapporto tra le dimensioni principali) come ad esempio nervature e pin. La qualità di questi elementi influenza sia l'aspetto che la funzionalità dei componenti stampati. Durante il processo di fresatura si generano delle sollecitazioni a flessione che possono portare alla deformazione o persino alla rottura nel caso di elementi ad elevato aspect ratio. Questo aspetto rende particolarmente critica la scelta dei parametri di processo per la produzione di elementi con elevata accuratezza dimensionale. I parametri di processo che hanno maggior influenza sulla qualità geometrica di elementi ad elevato aspect ratio sono [9]:

- la profondità assiale di taglio;
- la profondità radiale di taglio;
- l'avanzamento per dente;
- la strategia di fresatura.

In fig. [3.1] è mostrata una rappresentazione di questi parametri.

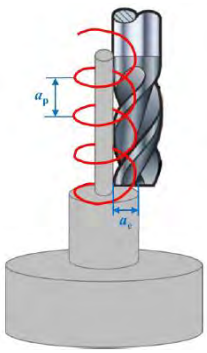

Figura 3.1 Realizzazione di un pin mediante micro fresatura [9]

La qualità geometrica di un elemento può essere valutata attraverso tre parametri [9]:

1. *Errore assoluto del diametro*: differenza tra il diametro effettivo e il diametro nominale;

2. *Cilindricità*: misura della variazione di diametro tra due sezioni dell'elemento;

3. *Punti fuori rettilineità*: il diametro minimo che contiene tutti i centri dei cerchi ottenuti sezionando l'elemento con dei piani. E' dunque una misura della rettilineità dell'asse dell'elemento.

La strategia migliore è la fresatura concorde in quanto è stato verificato che quella discorde porta a rottura quasi sistematicamente elementi ad elevato aspect ratio. Per ottenere elementi rettilinei è necessario applicare basse profondità di taglio assiale e basse profondità di taglio radiali. Inoltre un avanzamento per dente ridotto favorisce la qualità geometrica dell'elemento in termini di cilindricità e rettilineità. In fig. [3.2] sono riportati gli effetti qualitativi dei vari parametri di processo.

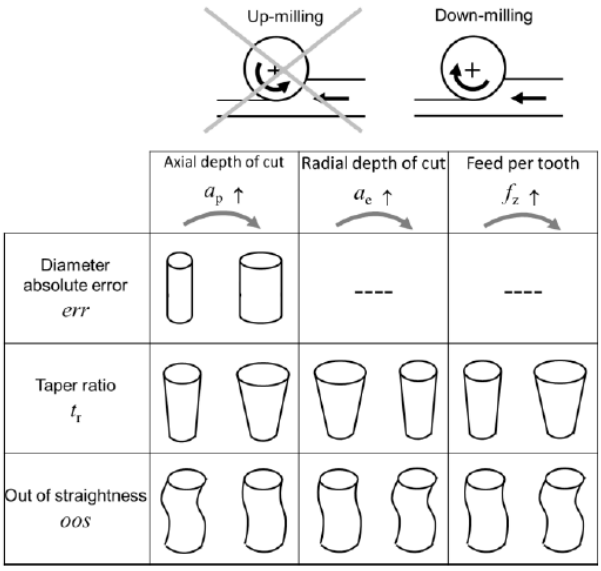

Figura 3.2 Effetti dei principali parametri della micro fresatura sulla qualità del prodotto [9]

4 Micro Stampaggio a Iniezione

Il micro stampaggio a iniezione è una tecnologia che deriva dallo stampaggio a iniezione tradizionale ma che differisce da quest'ultimo per vari aspetti. La necessità di adattare lo stampaggio a iniezione alla produzione di micro componenti è dovuta alla maggiore richiesta del mercato di produzioni su larga scala. La diffusione di questa tecnologia è dovuta inoltre alla ampia classe di biomateriali che possono essere processati per la realizzazione di dispositivi biomedicali. I materiali polimerici sono anche disponibili in una grande varietà di composizioni riuscendo così ad essere adatti alle più svariate specifiche funzionali.

4.1 Fasi del micro stampaggio a iniezione

Il processo di micro stampaggio a iniezione prevede dunque l'adattamento delle fasi del processo tradizionale alla produzione di micro componenti. Le ridotte dimensioni dei componenti mettono in evidenza la necessità di ridurre la quantità di materiale iniettabile. Questo comporta un problema di tipo tecnologico in quanto il diametro del nucleo della vite dovrebbe essere ridotto sensibilmente causandone un indebolimento strutturale. Infatti la vite deve garantire una resistenza sufficiente per l'applicazione di elevate velocità di iniezione necessarie a riempire componenti di piccole dimensioni. Inoltre spesso il peso di un singolo grano è superiore al peso del materiale che deve essere iniettato per realizzare il micro componente e la vite non può avere canali con profondità inferiore alle dimensioni standard dei grani. Se si decidesse di utilizzare una macchina tradizionale al minimo delle proprie capacità di iniezione riducendo la quantità di polimero da iniettare, il materiale rimarrebbe all'interno del cilindro (in testa alla vite) troppo a lungo con conseguenti problemi di degradazione [10]. Un altro inconveniente nel quale si incorre nella riduzione delle dimensioni della vite è l'impossibilità di controllare il dosaggio. Canali troppo piccoli non garantiscono inoltre un buona omogeneizzazione del materiale. Il valore minimo che si può ottenere della vite è 12 mm. Inoltre le elevate pressioni necessarie a riempire componenti di

piccole dimensioni causano un flusso di ritorno durante la fase di iniezione. Dunque, tenendo conto di tutte queste problematiche, risulta necessario separare in due unità distinte le fasi di plasticizzazione e iniezione. La prima fase viene svolta da una vite con una profondità dei canali sufficiente ad utilizzare grani di dimensione standard e tale da fornire una quantità massima di $5\,cm^3$ per l'iniezione in modo da ridurre al minimo il problema della degradazione. Valori tipici sono: $D = 14 \div 18\,mm$ e $L/D = 15 \div 18\,mm$. La seconda fase è invece svolta da un pistone con diametro inferiore ai 5 mm per un accurato dosaggio. Le presse per il micro stampaggio a iniezione sono inoltre dotate di forze di chiusura massima inferiore poiché componenti di piccole dimensioni hanno aree proiettate piccole.

Di conseguenza le fasi del processo di micro stampaggio a iniezione sono generalmente:

1. *Plastificazione*: il polimero è fuso dall'azione rotativa della vite ed è accumulato nella camera di dosaggio;

2. *Chiusura della valvola di non ritorno*: quando la quantità stabilita di materiale nella camera di dosaggio è stata raggiunta la valvola di non ritorno si chiude per evitare fenomeni di riflusso;

3. *Dosaggio*: il pistone all'interno della camera di dosaggio spinge il polimero nell'unità d'iniezione;

4. *Iniezione*: il pistone dell'unità d'iniezione spinge il polimero fuso all'interno dello stampo;

5. *Impaccamento*: terminata la fase d'iniezione il pistone continua ad avanzare lentamente per applicare una pressione tale da compensare il ritiro dimensionale del componente;

6. *Raffreddamento*: quando il gate è completamente congelato è necessario attendere un tempo sufficiente al raggiungimento della temperatura di estrazione. Come nello stampaggio tradizionale durante questa fase avviene la plastificazione di altro materiale;

7. *Estrazione*: il componente è forzato meccanicamente a lasciare lo stampo mediante estrattori. Questa fase assume un aspetto rilevante nel micro stampaggio a iniezione. Le forze d'attrito che si generano dati gli elevati rapporti tra le dimensioni principali sono rilevanti e dunque il pezzo può rimanere danneggiato perdendo le proprie funzionalità.

In fig. [4.1] sono mostrate le prime fasi del processo di micro stampaggio a iniezione.

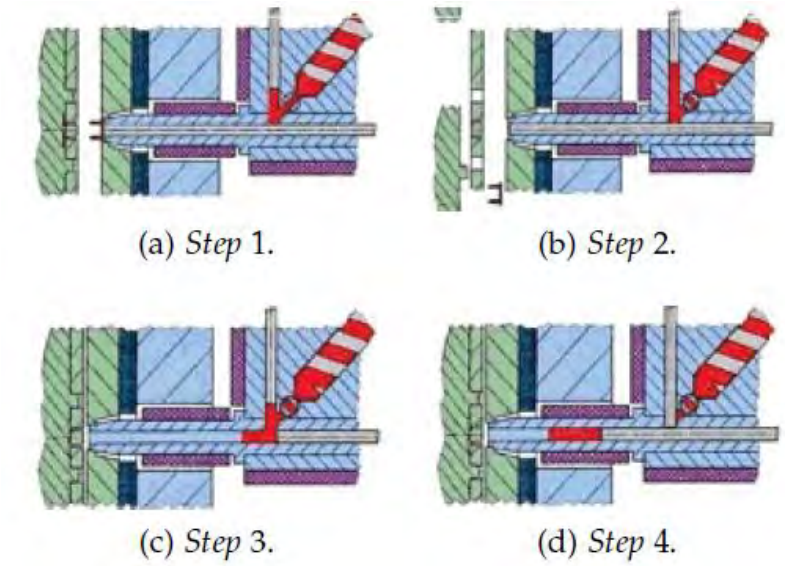

Figura 4.1 Fasi di un ciclo di micro stampaggio a iniezione [11]

In questo caso la fase di raffreddamento è di gran lunga superiore alla fase di iniezione.

4.2 Macchina per il micro stampaggio a iniezione

Per questo lavoro è stata utilizzata una Wittmann Battenfeld MicroPower 15t (fig. [4.2]).

Figura 4.2 Wittmann Battenfeld MicroPower 15t

Il funzionamento di questa macchina differisce leggermente da quello descritto precedentemente. Le fasi sono le stesse con la differenza che in questo caso non è presente un pistone nella camera di dosaggio ma è la vite stessa a convogliare il materiale plastificato ad alta pressione nell'ugello (fig. [4.3]) .

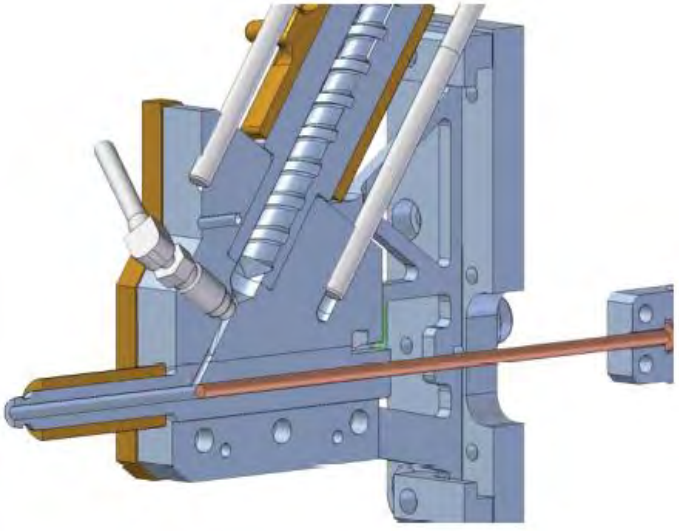

Figura 4.3 Vista in sezione di una Wittmann Battenfeld MicroPower 15t [12]

Le unità che costituiscono una macchina per il micro stampaggio a iniezione sono:

1. *Unità plasticizzante:* ha lo scopo di plastificare il materiale. Non è collocata orizzontalmente in quanto la fase di iniezione viene eseguita da un altro elemento;

2. *Unità d'iniezione:* ha lo scopo di dosare la quantità di materiale sufficiente a riempire la cavità applicando pressioni elevate;

3. *Unità di chiusura:* è costituita da un motore elettrico che permette allo stampo di chiudersi evitando la formazione di bava;

4. *Cavità dello stampo*: ha gli stessi scopi di quella dello stampaggio a iniezione tradizionale.

I dati tecnici di questa macchina sono riportati in tab. [4.1].

	Proprietà	**u.m.**	**Valore**
Unità di chiusura	Forza di chiusura	kN	150
	Forza di apertura	kN	150/15
	Forza degli estrattori	kN	40/5
Unità d'iniezione	Diametro della vite	mm	14
	Volume della vite di dosaggio	cm^3	26
	Rapporto L/D della vite	/	20
	Diametro del pistone	mm	8
	Volume del pistone	cm^3	4
	Pressione d'iniezione	bar	2500
	Massima velocità della vite	min^{-1}	200
	Massimo tasso di plasticizzazione	g/s	1,7
	Massima torsione	Nm	90
	Velocità d'iniezione	Mm/s	750
	Portata d'iniezione in aria	cm^3/s	38
	Potenza di riscaldamento del cilindro	kW	2.45
Guida	Riserva potenza elettrica	kVA	9

Tabella 4.1 Dati tecnici di una Wittmann Battenfeld MicroPower 15t

4.3 Scelta del Materiale

La scelta del materiale per la realizzazione di un micro componente viene eseguita principalmente sulla base delle seguenti proprietà:

1. *Proprietà meccaniche:* i parametri che caratterizzano meccanicamente un materiale polimerico sono il modulo elastico longitudinale E e la tensione di snervamento σ_s. Un ulteriore aspetto fondamentale di questi materiali è il *creep*. Il creep è la dipendenza dal tempo delle proprietà meccaniche. Questo comportamento è una conseguenza della natura viscoelastica dei materiali polimerici. Ogni materiale ha le proprie curve di creep che vengono ricavate mediante semplici prove di trazione [13] (fig. [4.4]).

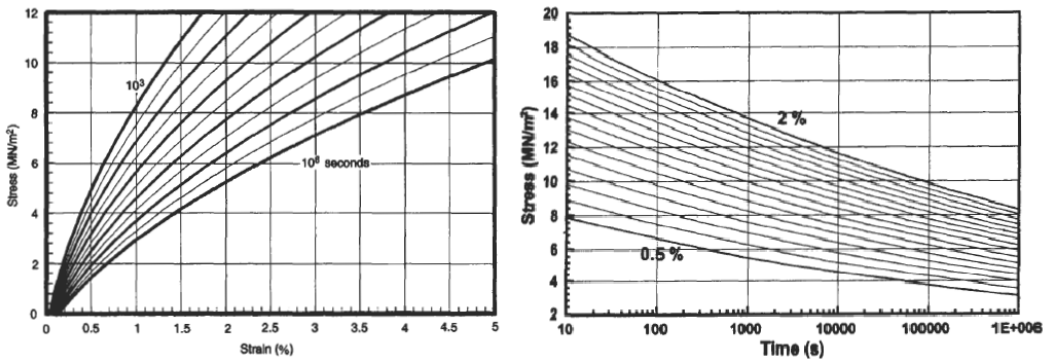

Figura 4.4 Curve isocrone e isometriche di un Polipropilene [13]

Le prime sono dette curve isocrone perché sono ricavate per determinati valori del tempo di applicazione del carico, mentre le seconde sono dette curve isometriche perché sono ricavate per determinati valori di deformazione imposta.

2. *Processabilità*: i parametri che caratterizzano la processabilità di un materiale polimerico sono la viscosità η e il ritiro volumetrico %. La viscosità infatti quantifica la resistenza del fluido allo scorrimento. Minore è la viscosità, maggiore è la sua capacità di riempire cavità con spessori sottili. Nel micro stampaggio a iniezione, dato che gli spessori dei

componenti possono arrivare a pochi micron, è necessario utilizzare polimeri ad elevata fluidità e temperature elevate dello stampo e del fuso [14]. La viscosità nella maggior parte dei polimeri non è newtoniana, ma ha un comportamento che viene definito *shear thinning*. La viscosità è infatti funzione della temperatura e della velocità di deformazione (fig. [4.5]). La zona in cui la viscosità è costante è detta *regione newtoniana* mentre quella dove la viscosità decresce è detta *regione power law*. I valori della regione newtoniana si ricavano con il reometro piatto-cono, mentre quelli appartenenti alla regione power law si ricavano con il reometro capillare. Nella pratica dunque per avere il comportamento completo della viscosità in funzione del tempo sarebbe necessario svolgere prove sia al reometro capillare che al reometro piatto-cono.

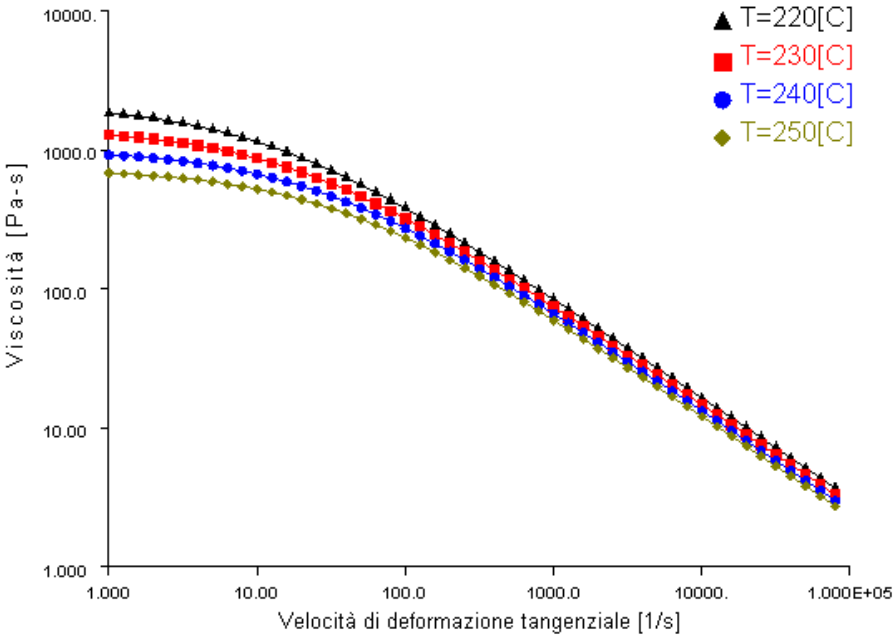

Figura 4.5 Curve di viscosità del PS 1541 Total

Per interpolare i valori ottenuti dalle prove reologiche viene generalmente utilizzata l'equazione di Cross.

$$\eta = \frac{\eta_0}{(1 + \lambda\dot{\gamma})^{1-n}}$$

dove $\lambda = \frac{\eta_0}{\tau^*}$.

Il significato di η_0 e τ^* è riportato in fig. [4.6].

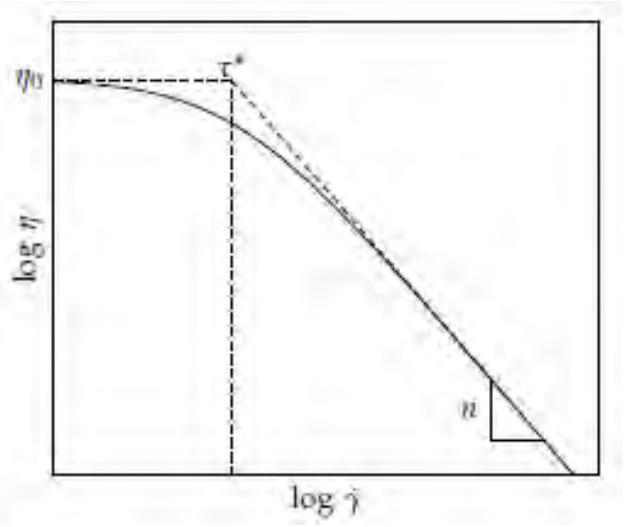

Figura 4.6 Equazione di Cross

Il ritiro volumetrico % quantifica invece la variazione di volume che subisce il componente durante il raffreddamento. Il ritiro varia in funzione della natura del materiale: amorfo, cristallino e semi cristallino (fig. [4.7]).

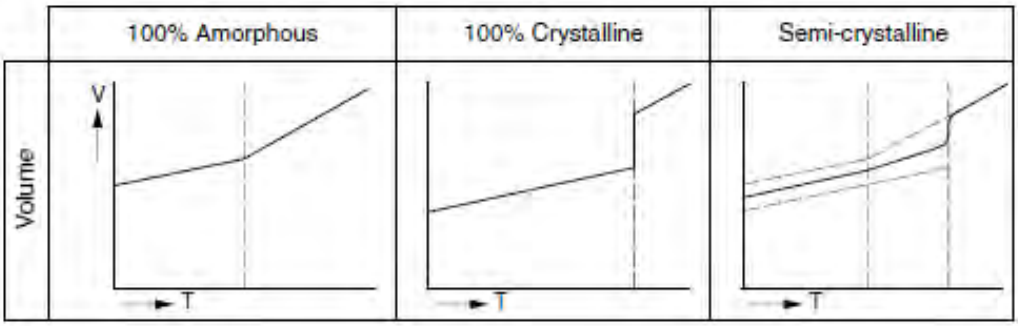

Figura 4.7 Ritiro volumetrico per differenti materiali polimerici [6]

I polimeri cristallini ritirano di più rispetto ai polimeri amorfi. Una conseguenza diretta di questo comportamento è il fatto che i polimeri amorfi sono trasparenti. Questa è una proprietà che è richiesta in molte applicazioni come ad esempio la produzione di fanaleria in policarbonato (PC). Il ritiro volumetrico è però sensibilmente influenzato dalla

pressione. Le curve che tengono in considerazione tutte le variabili che influenzano il ritiro sono dette curve Pvt (fig. [4.8]).

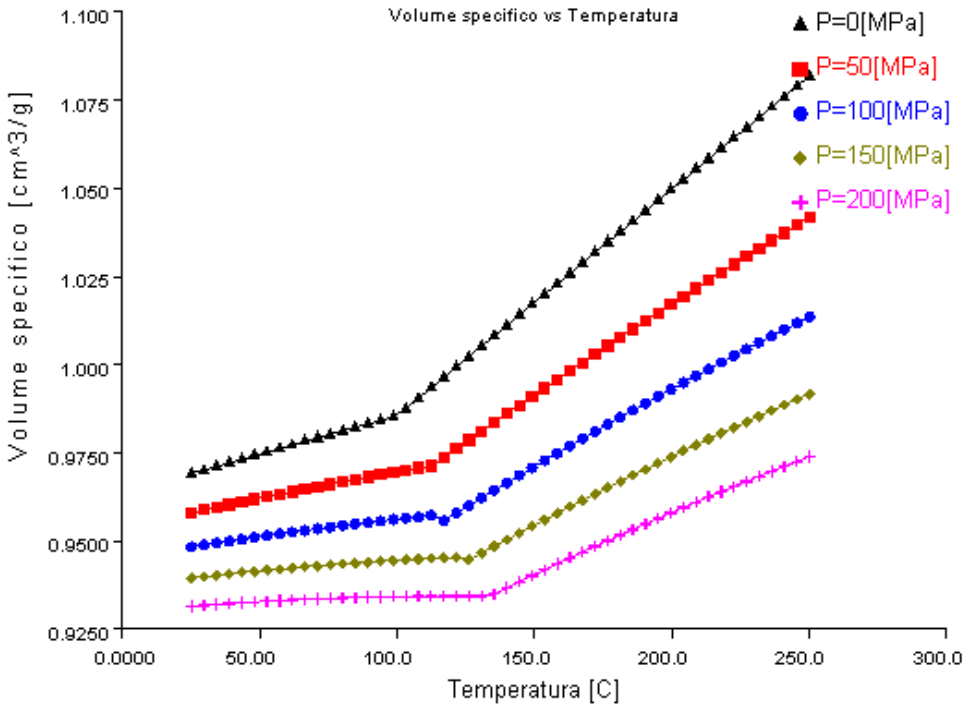

Figura 4.8 Curve Pvt del PS 1541 Total

4.4 Parametri di processo

Il processo di micro stampaggio a iniezione è influenzato da numerosi parametri di processo tra i quali:

1. Temperatura d'iniezione;
2. Temperatura stampo;
3. Velocità d'iniezione;
4. Pressione di mantenimento.

La scelta dei valori da attribuire ai parametri di processo viene generalmente fatta sulla base delle simulazioni numeriche. Il fenomeno fisico che caratterizza maggiormente il processo di micro stampaggio a iniezione è *l'effetto pelle*. Questo è legato principalmente ai parametri temperatura d'iniezione, temperatura stampo e velocità d'iniezione. L'effetto pelle consiste nella formazione di un sottile strato solido quando il polimero fuso viene a contatto con la superficie dello stampo a temperatura più bassa. La conseguenza diretta di questo fenomeno è la formazione di un flusso di riempimento a fontana. Nel caso di superfici micro strutturate in relazione all'effetto pelle può verificarsi il fenomeno dell'*esitazione.* Questo si verifica durante la fase di riempimento della cavità principale in particolare nel caso di strutture ad elevato aspect ratio [15] [16]. Il materiale fuso che fluisce nella cavità di sezione maggiore ristagna all'entrata delle micro strutture caratterizzate da sezioni aventi diversi ordini di grandezza in meno [15], [16], [17], [18]. Questo può succedere anche nel caso vengano applicate elevate pressioni di mantenimento [19]. Infatti nel caso in cui il tempo di riempimento delle micro strutture sia superiore al tempo di solidificazione del polimero si ha la formazione di un sottile strato solido che impedisce il riempimento delle micro strutture. La temperatura dello stampo e la temperatura d'iniezione sono dunque fondamentali per ridurre questo effetto. Infatti all'aumentare di queste temperature il materiale acquista maggior fluidità grazie al diminuire della sua viscosità migliorando la fase di riempimento [20], [21]. Ovviamente un aumento di queste temperature implica un tempo ciclo maggiore. Si è dimostrato che il metodo più efficace per contrastare il fenomeno dell'esitazione è l'utilizzo di temperature dello stampo prossime a T_g [15], [22]. Anche la velocità d'iniezione influenza il riempimento della cavità. Ad elevate velocità d'iniezione si riducono il tempo di riempimento e il raffreddamento del fuso limitando l'effetto pelle [21]. Nel caso di micro componenti l'utilizzo di elevate velocità d'iniezione può causare il riscaldamento del polimero per attrito viscoso migliorando ulteriormente il riempimento [20]. Infine la

pressione di mantenimento risulta fondamentale per contrastare il ritiro volumetrico e ridurre le deformazioni durante il raffreddamento. Inoltre aiuta il fuso nel riempimento della cavità.

4.5 Forza di estrazione

Durante la fase di estrazione il componente viene separato dallo stampo mediante l'uso di estrattori. Questo è necessario in quanto durante il raffreddamento si genera una forza di attrito tra le superficie del componente e quelle dello stampo a causa del ritiro volumetrico [23]. Quando le dimensioni assolute di un componente si riducono le zone dove applicare le forze di estrazione diminuiscono e diventano meno resistenti. Nel caso di componenti con elevati aspect ratio le forze d'attrito inoltre possono risultare particolarmente elevate. Per evitare il danneggiamento del componente è necessario dunque ridurre le forze di estrazione. Data la funzionalità delle superfici micro strutturate e la grande integrazione tra i componenti che costituiscono il prodotto, anche una deformazione può portare allo scarto del componente. Inoltre le elevate forze da applicare per estrarre il componente possono portare alla rottura dello stampo [24]. Per determinare quali siano i parametri tecnologici e di processo che maggiormente influenzano le forze di estrazione sono stati fatti molti studi. L'utilizzo di un angolo di sformo può essere la soluzione pratica più semplice per ridurre le forze di estrazione (fig. [4.9]) [25].

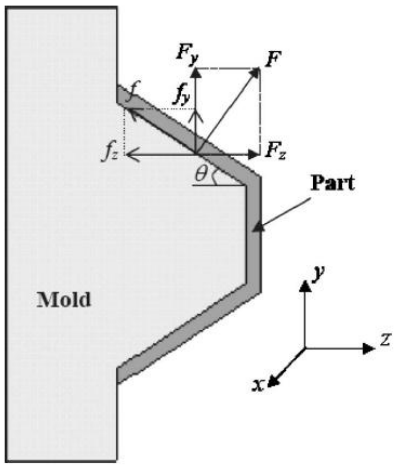

Figura 4.9 Effetto dell'angolo di sformo sulle forze d'estrazione [25]

Infatti la forza d'attrito è direttamente proporzionale alla pressione che il componente esercita sullo stampo (conseguenza diretta del ritiro dimensionale) secondo la formulazione di Coulomb:

$$F_A = \mu * P * A$$

dove μ è il coefficiente d'attrito, P la pressione di contatto tra il componente e lo stampo, A l'area di contatto. Le forze di pressione agiscono in direzione ortogonale alla superficie dello stampo. Dunque, dato che la forza per estrarre il pezzo deve essere applicata lungo la direzione di apertura dello stampo, l'angolo di sformo fa si che venga considerata solo la componente della forza d'attrito lungo l'asse di estrazione. Di conseguenza maggiore è l'angolo di sformo minore è la forza da applicare per estrarre il componente, indipendentemente da tutti gli altri fattori. Nei micro componenti però non è sempre possibile applicare angoli di sformo per motivi funzionali e realizzativi. L'ottimizzazione del processo di micro stampaggio a iniezione richiede di conoscere e prevedere il comportamento dell'attrito durante la fase d'estrazione [26].

4.5.1 Calcolo delle forze d'estrazione per geometrie semplici

E' possibile calcolare analiticamente le forze di estrazione nel caso di geometrie semplici [25]. Si consideri un componente cilindrico cavo (fig. [4.10]). La forza di estrazione può essere calcolata seguendo la procedura descritta di seguito.

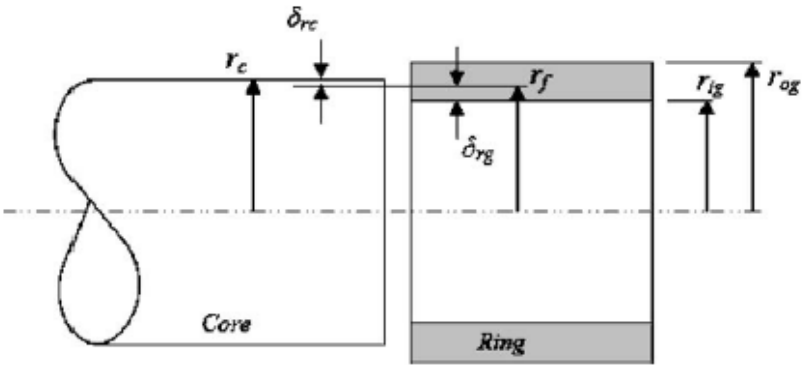

Figura 4.10 Notazioni per la stima della forza d'attrito nel caso di un elemento cilindrico [25]

Assumendo che la pressione sia uniforme su tutta la superficie di contatto, la forza di reazione è pari a:

$$F_R = p(2\pi r_f L)$$

dove L è la lunghezza della superficie dove agisce la pressione e r_f il raggio finale.

La deformazione radiale del cilindro cavo è:

$$\delta_{rg} = \frac{r_f p}{E_g}\left(\frac{r_{og}^2 + r_f^2}{r_{og}^2 - r_f^2} + v_g\right)$$

dove E_ge v_g sono rispettivamente il modulo di elasticità tangenziale e il modulo di Poisson dell'anello.

La deformazione radiale dello stampo è invece:

$$\delta_{rc} = -\frac{r_f p}{E_c}(1 - v_c)$$

dove E_ce v_c sono rispettivamente il modulo di elasticità tangenziale e il modulo di Poisson dello stampo.

Il rapporto tra le due deformazioni è:

$$\frac{\delta_{rc}}{\delta_{rg}} = \frac{E_g}{E_c}\frac{v_c - 1}{\left(\frac{r_{og}^2 + r_c^2}{r_{og}^2 - r_c^2} + v_g\right)}$$

Per determinare la pressione è possibile utilizzare analogamente una delle due equazioni precedenti. Per farlo è necessario però calcolare il raggio finale:

$$r_f = r_{ig} + \delta_{rg} = r_c + \delta_{rc}$$

Combinando questa equazione con quella che esprime il rapporto tra le deformazioni si ottiene:

$$r_f = r_c + \frac{E_g(v_c - 1)\left(r_c - r_{ig}\right)}{E_c\left(\frac{r_{og}^2 + r_c^2}{r_{og}^2 - r_c^2} + v_g\right) - E_g(v_c - 1)}$$

Dunque è possibile calcolare la pressione misurando la deformazione radiale del componente. Questo può essere fatto mediante simulazione numerica attraverso una valutazione del ritiro volumetrico. La forza di estrazione si ottiene moltiplicando la forza di reazione per il coefficiente d'attrito:

$$F_E = \mu F_R$$

4.5.2 Coefficiente d'attrito

Spesso però il coefficiente d'attrito non è noto perché è sensibilmente influenzato dalla finitura superficiale dello stampo e dai parametri di processo. Il coefficiente d'attrito è influenzato complessivamente da tre fenomeni fisici [27]:

$$\mu = \mu_{deformazione} + \mu_{solcatura} + \mu_{adesione}$$

1. *Deformazione*: quando il componente viene estratto avviene la deformazione delle asperità della superficie del componente a causa dello strisciamento sulla superficie dello stampo. Questo contributo è particolarmente rilevante quando il polimero replica la rugosità superficiale dello stampo. In questo caso è necessario che la forza di estrazione rompa il materiale nelle gole della rugosità superficiale per farlo scorrere (fig. [4.11]);

Figura 4.11 Deformazione delle asperità di un componente durante l'estrazione [27]

2. *Solcatura*: è il fenomeno che avviene all'interfaccia tra la superficie dello stampo e la superficie del componente a causa della rugosità superficiale. La forza da applicare deve essere tale da far si che la superficie dello stampo solchi la superficie del componente. Questo fenomeno può essere alternativo al precedente ma spesso coesistono in relazione al tipo di topografia superficiale dello stampo (fig. [4.12]);

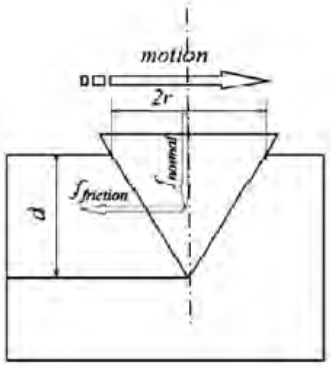

Figura 4.12 Solcatura di un componente durante l'estrazione [27]

3. *Adesione*: è l'interazione molecolare tra la superficie del componente e la superficie dello stampo. Questo contributo diventa rilevante quando la superficie dello stampo è lucidata a specchio ($R_a < 0{,}05\ \mu m$) [28] o per una particolare affinità chimica tra i materiali [29] (fig. [4.13]).

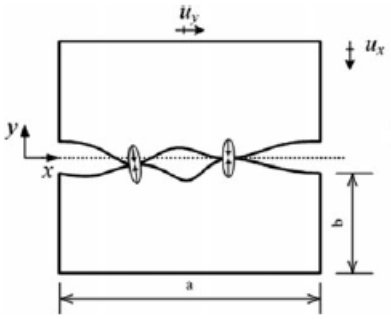

Figura 4.13 Adesione del componente allo stampo durante l'estrazione [27]

4.5.3 Replicazione della superficie dello stampo

Quando il componente ritira il materiale non solo genera una pressione sullo stampo ma tende anche a replicare la topografia della superficie dello stampo [30] (Fig. [4.14]).

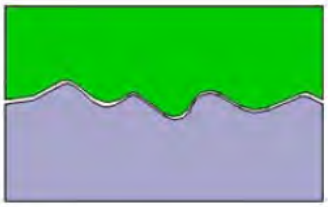

Figura 4.14 Replicazione della superficie dello stampo [30]

Entrambi questi aspetti sono influenzati dai parametri di processo tra i quali temperatura d'iniezione, velocità d'iniezione e pressione di mantenimento [30] (Fig. [4.15]).

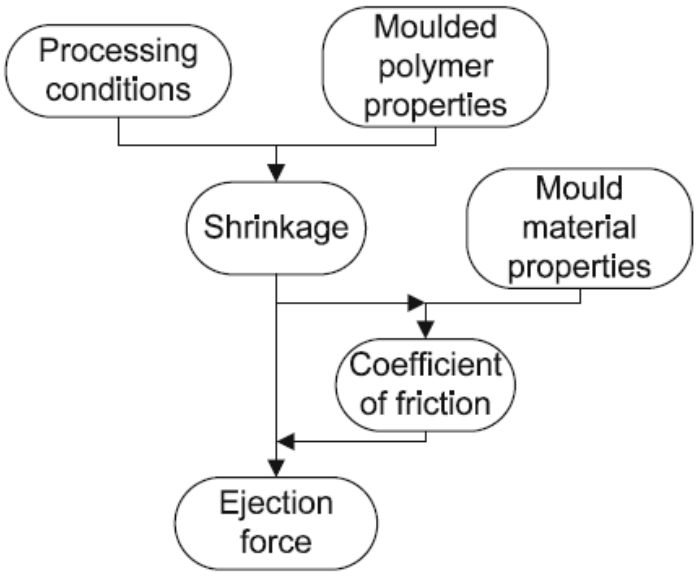

Figura 4.15 Fattori che influenzano l'estrazione nel micro stampaggio a iniezione [30]

Questo fenomeno non viene generalmente considerato nelle prove tribologiche ma deve essere considerato nel processo di micro stampaggio a iniezione. Il polimero replica infatti la rugosità superficiale dello stampo la cui caratterizzazione risulta dunque un parametro fondamentale [31]. La rugosità superfiale è dunque il parametro tecnologico di maggior interesse per l'analisi delle forze di estrazione. A tal proposito è stato osservato mediante un approccio misto, che per rugosità superficiali medie pari a $R_a = 0{,}5\ \mu m$, le forze di estrazione aumentano con la rugosità superficiale, la pressione di contatto e diminuiscono all'aumentare della temperatura [27]. Questo approccio è basato

su un modello analitico per stimare la componente di solcatura, su un modello numerico per stimare la deformazione e su prove sperimentali per stimare l'adesione. Le prove sono state eseguite con un PP Dolmen 1100 N avente indice di fluidità pari a $MFI = 12g/10min$. Lo stampo è stato realizzato invece con un acciaio AISI H13 1.2344. Per questi valori di rugosità diventa rilevante la componente di adesione e di conseguenza assumono grande rilevanza anche i fattori che la possono influenzare tra cui il tipo di materiale.

4.5.4 Misura del coefficiente d'attrito

Molti studi sono stati condotti per determinare coefficienti d'attrito appropriati. In particolare è stata studiata l'influenza di variazioni della temperatura dello stampo, della rugosità superficiale, della pressione di mantenimento e della velocità d'estrazione. Per poter tener conto di questi parametri è stato sviluppato un apparato sperimentale adeguato [26] (fig. [4.16]).

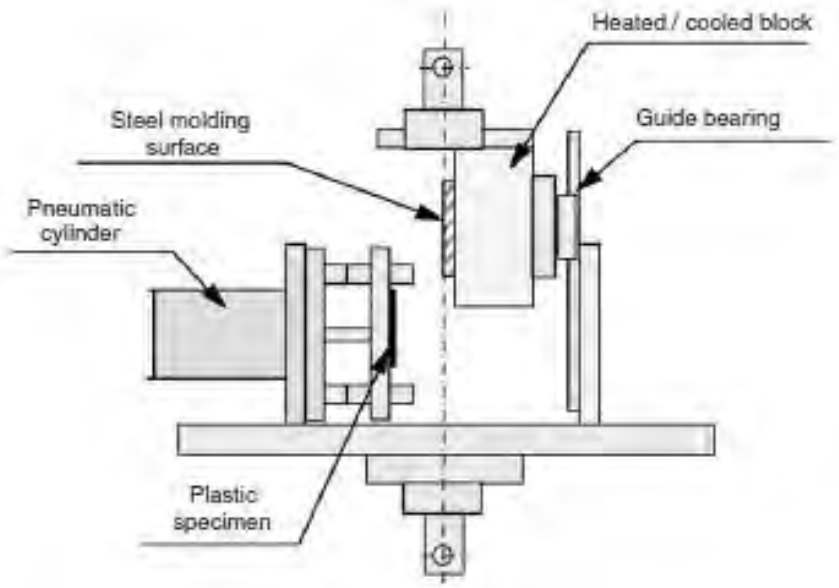

Figura 4.16 Macchina per la determinazione del coefficiente d'attrito [26]

Questo apparato è stato sviluppato seguendo le seguenti specifiche:

1. Range di temperature operative in grado di riprodurre le temperature del processo di stampaggio a iniezione: $20 \div 180\ °C$;

2. Range di velocità di esecuzione (strisciamento) delle prove in grado di riprodurre le condizioni d'estrazione: $1 \div 100\ mm/min$;

3. Replicazione della rugosità superficiale dello stampo sulla superficie del provino;

4. Controllo della forza normale di contatto tra la superficie dello stampo e quella del provino;

5. Controllo dell'evoluzione della forza di attrito nel tempo.

L'esecuzione di queste prove prevede il seguente procedimento:

1. Riscaldamento della superficie dello stampo alla temperatura di replicazione;

2. Stabilizzazione della temperatura;

3. Applicazione della pressione di contatto per ottenere la replicazione della rugosità superficiale;

4. Abbassamento della temperatura fino al valore di temperatura d'estrazione;

5. Esecuzione del test d'attrito alla velocità prestabilita.

I risultati sperimentali mostrano che per materiali semi cristallini ed amorfi esiste una correlazione tra il coefficiente d'attrito sia con la temperatura che con la rugosità superficiale. In tutti i casi studiati, che prevedevano l'utilizzo di ABS, PC, HDPE, PMMA, si è rilevato un aumento del coefficiente d'attrito con l'aumento della rugosità attribuibile agli effetti meccanici delle asperità. Al diminuire della rugosità, fino ad ottenere superfici lucidate a specchio (ovvero

superfici caratterizzate da $R_t < 1\,\mu m$) si è osservato però un aumento delle forze d'attrito attribuibile alle forze di adesione tra le due superfici. Questi risultati sono in accordo dunque con quelli determinati da altri autori [27], [30], [31]. Le prove eseguite con questo nuovo apparato hanno determinato valori del coefficiente d'attrito, calcolato come $\mu = F/N$, differenti da quelli già presenti in letteratura.

4.5.5 Influenza dei parametri di processo sulla forza d'estrazione

L'influenza di R_a sulle forze di estrazione deve essere inoltre studiata in funzione delle variabili di processo e delle proprietà del materiale che influenzano il ritiro del componente, la replicazione della superficie dello stampo e l'adesione tra il componente e lo stampo. Ad esempio la tendenza a replicare la topografia della superficie dello stampo aumenta all'aumentare della temperatura d'iniezione. Per questo motivo alcuni autori hanno studiato il fenomeno eseguendo direttamente prove sperimentali di micro stampaggio a iniezione. La geometria più utilizzata è quella di un anello circolare. I parametri di processo che influenzano maggiormente le forze di estrazione sono [32]:

1. Temperatura d'iniezione;
2. Temperatura stampo;
3. Pressione di mantenimento;
4. Velocità d'iniezione.

Questo studio è interessante in quanto a differenza di altri utilizza materiali strettamente attinenti alla realizzazione di dispositivi micro fluidici come ad es. il COC. Inoltre l'analisi di questi parametri viene eseguita applicando la programmazione degli esperimenti (DoE). Gli effetti principali e le interazioni sono stati analizzati mediante analisi della varianza. I risultati ottenuti mostrano

effetti delle interazioni significativi solamente per le coppie di parametri: pressione di mantenimento e velocità d'iniezione, temperatura di iniezione e velocità d'iniezione. Inoltre si è osservato che la forza di estrazione è maggiormente influenzata dalla temperatura d'iniezione e dalla velocità d'iniezione; livelli alti di questi parametri aumentano il valore assoluto della forza d'estrazione. L'effetto della temperatura d'iniezione, anche se in maniera minore della temperatura dello stampo, è quello di aumentare la componente di replicazione mentre l'effetto della pressione di mantenimento è quello di indurre nel componente tensioni interne che contribuiscono ad aumentare la forza d'estrazione. Anche altri autori hanno studiato queste interazioni indagando fondamentalmente gli stessi parametri. Si è visto che per il PP le forze d'attrito decrescono al diminuire della rugosità superficiale fino a valori di $R_a = 0{,}212\ \mu m$ per poi tornare a crescere anche con valori di rugosità pari a $R_a = 0{,}026\ \mu m$ indipendentemente dal valore di pressione d'iniezione [33] (fig. [4.17]).

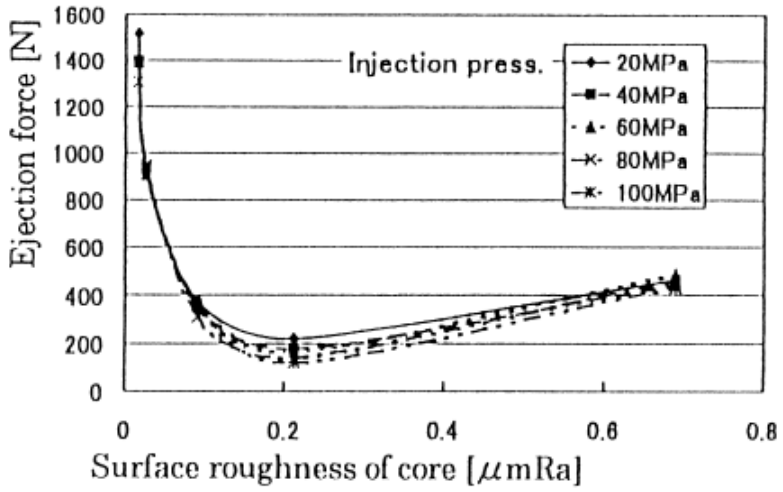

Figura 4.17 Andamento della forza d'estrazione al variare della rugosità per il PP [33]

Questi esperimenti sono stati condotti stampando piccoli anelli circolari. Lo stesso comportamento è stato analizzato per altri materiali nello stesso studio. Il PET e il PMMA mostrano rispettivamente il minimo di forza d'estrazione per valori di rugosità pari a $R_a = 0{,}212\ \mu m$ (fig. [4.18]) e $R_a = 0{,}092\ \mu m$ (fig. [4.19]).

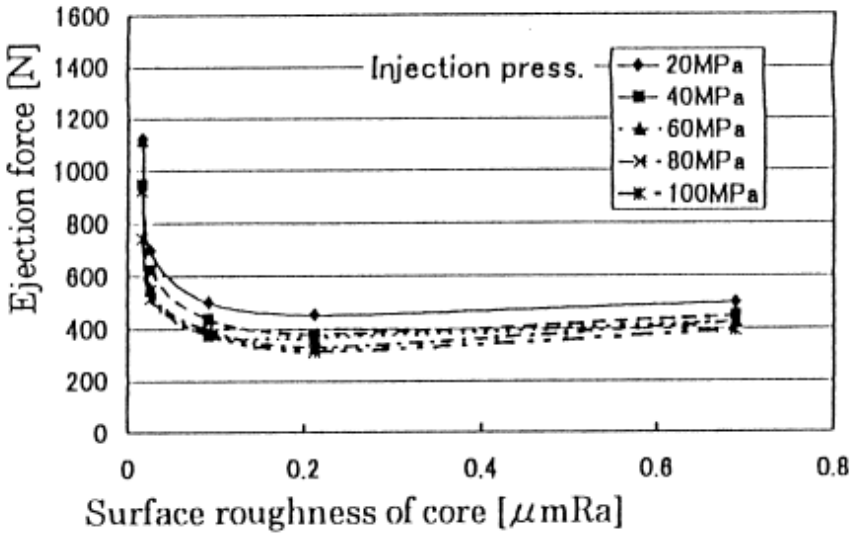

Figura 4.18 Andamento della forza d'estrazione al variare della rugosità per il PET [33]

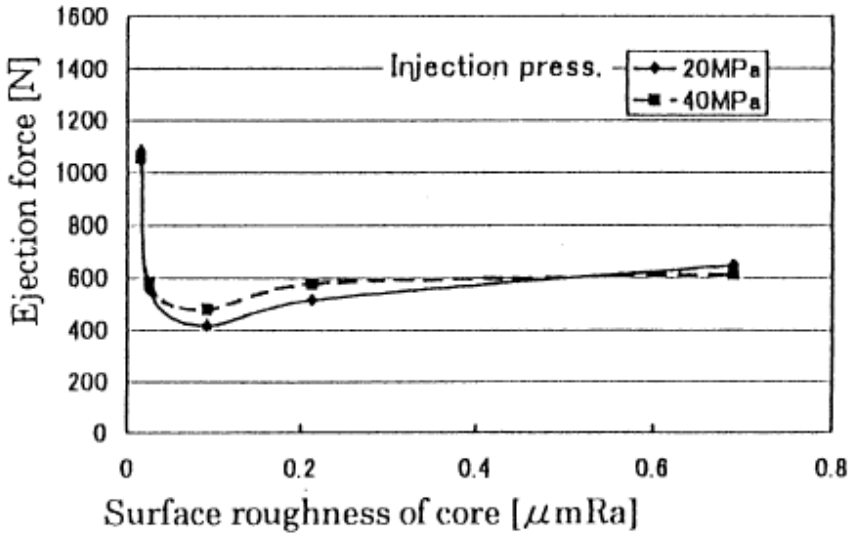

Figura 4.19 Andamento della forza d'estrazione al variare della rugosità per il PMMA [33]

Gli autori attribuiscono a questo comportamento le stesse cause. Per conferma è stata eseguita un'analisi al microscopio della superficie dei provini osservando per valori elevati di rugosità superficiale delle solcature non presenti invece nel caso di superfici lisce. Una riduzione delle forze di estrazione è stata determinata mediante l'uso di trattamenti superficiali, ad esempio il DLC. Questo comportamento è da attribuire principalmente alla minore adesione tra i

materiali in quanto con questi processi si ottengono comunque rugosità superficiali nell'ordine di $R_a = 0{,}020\ \mu m$. Anche il rivestimento WC/C è risultato essere molto efficace nella riduzione delle forze d'estrazione. Un ulteriore studio è stato eseguito su una struttura tubulare ma di dimensioni maggiori: $S = 2\ mm$, $D = 60\ mm,\ L = 146\ mm$ [34]. I materiali utilizzati sono: PC, PS, PP caricato talco. I parametri di processo fatti variare sono: la temperatura d'iniezione, la temperatura dello stampo all'estrazione, la pressione di mantenimento, il tempo di mantenimento. L'effetto dell'aumento della temperatura dello stampo all'estrazione per il PP è quello di ridurre la forza d'estrazione. Questo è dovuto al fatto che il componente all'aumentare della temperatura subisce una diminuzione del modulo elastico e del ritiro all'estrazione, fattori che contribuiscono entrambi a ridurre le forze d'estrazione. L'effetto della temperatura d'iniezione per il PP mostra un punto di ottimo che minimizza la forza. Questo viene spiegato per l'effetto simultaneo della diminuzione di ritiro volumetrico ad elevate temperature d'iniezione, per una maggiore capacità di trasmissione della pressione e per il maggiore effetto di replicazione della rugosità superficiale ad elevate temperature. Si è osservato invece, per tutti i materiali (PC, PS e PP), un valore di pressione di mantenimento che massimizza la forza di estrazione. Questo è stato giustificato dal fatto che a basse pressioni di mantenimento il pezzo può staccarsi dalla superficie dello stampa causando minori forze d'estrazione. Con elevati valori di pressione di mantenimento diminuisce il ritiro volumetrico diametrale.

Parte II

Materiali e Metodi

5 Programmazione Degli Esperimenti

Un esperimento consiste nell'esecuzione di una serie di prove nelle quali le variabili di controllo del processo vengono fatte variare per osservare come cambia la risposta. Un processo può essere infatti rappresentato in modo del tutto generale come in fig. [5.1].

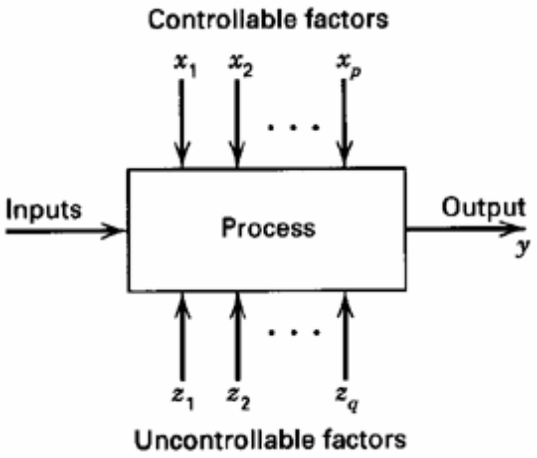

Figura 5.1 Rappresentazione generale di un processo [35]

Principalmente le prove sono svolte in ambito di sviluppo industriale o di ricerca scientifica per i seguenti motivi:

1. Ridurre il tempo di progettazione;
2. Confrontare diverse configurazioni di progetto;
3. Sviluppare nuovi prodotti o processi;
4. Aumentare il volume prodotto;
5. Ridurre i costi complessivi di sviluppo e produzione;
6. Migliorare le prestazioni di un processo esistente;
7. Aumentare l'affidabilità e le prestazioni di un prodotto;
8. Realizzare un prodotto o un processo robusto;
9. Determinare le tolleranze di un sistema.

La programmazione degli esperimenti (Design Of Experiments) è una procedura che prevede l'utilizzo di metodologie ingegneristiche per il

raggiungimento dei seguenti scopi principali mediante l'esecuzione di un numero minimo di prove:

1. ***Caratterizzazione di un processo***:
   La caratterizzazione di un processo consiste nel determinare quali variabili in ingresso x_p influenzano maggiormente la risposta e secondo quale relazione. Per fare questo si eseguono una serie di prove in cui le variabili in ingresso sono fatte variare per poter osservare le corrispondenti variazioni della risposta. La metodologia utilizzata per programmare l'esecuzione di queste prove è *l'esperimento fattoriale*. Successivamente viene condotta un'analisi di tipo statistico dei dati raccolti nota come *analisi della varianza (ANOVA)*.

2. ***Ottimizzazione di un processo***: terminata la fase di caratterizzazione può essere eseguita l'ottimizzazione del processo. Questa fase consiste nel determinare le condizioni operative del processo che garantiscono le prestazione migliori della grandezza in uscita scelta. L'ottimizzazione del processo è eseguita utilizzando *il metodo delle superfici di risposta*. In alcuni casi si è invece interessati alla robustezza del processo, ovvero alla determinazione delle condizioni operative di processo che garantiscono la minor variabilità della grandezza in uscita in presenza di fattori di disturbo, come ad es. variazioni di condizioni ambientabili non controllabili. E' possibile ottenere un processo robusto utilizzando il *metodo di Taguchi*.

Si riporta la procedura dettagliata per la programmazione di un esperimento [35]:

1. Riconoscimento ed enunciazione del problema
2. Scelta dei fattori e dei loro livelli
3. Selezione della variabile di risposta
4. Scelta del piano sperimentale
5. Esecuzione dell'esperimento

6. Analisi dei dati
7. Conclusioni e raccomandazioni

5.1 Esperimenti fattoriali

L'utilizzo di un piano fattoriale si rende necessario quando in un esperimento sono presenti molti fattori da studiare. Questa metodologia prevede l'esecuzione di tutte le possibili combinazioni dei livelli. In questo modo è possibile determinare l'interazioni tra i vari fattori.

Se i fattori di un esperimento sono k e ognuno di questi ha due livelli allora la notazione del piano fattoriale è 2^k.

5.1.1 Piano 2^2

Si consideri per semplicità un esperimento con due fattori aventi ognuno due livelli. La notazione che assume il piano è: 2^2.

I fattori sono generalmente indicati con la lettera maiuscola, A e B, mentre i corrispondenti livelli sono contraddistinti da un segno (-), nel caso in cui il fattore assuma il valore più basso, e da un segno (+), nel caso in cui il fattore assuma invece il valore più alto. Per indicare le singole prove si utilizzano le lettere dell'alfabeto: se viene utilizzata la lettera minuscola del corrispondente fattore significa che il valore del livello è alto. Nel caso in cui entrambi i livelli siano bassi si utilizza la notazione (1). La rappresentazione grafica di un piano 2^2 è riportata in fig. [5.2] con le corrispondenti notazioni.

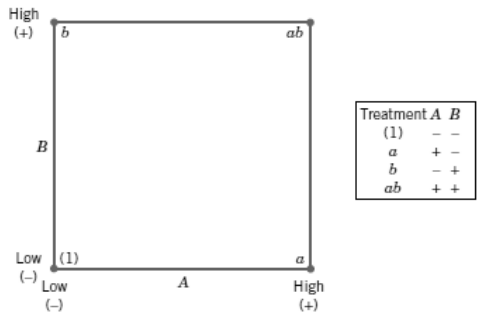

Figura 5.2 Rappresentazione grafica di un piano fattoriale 2^2 [35]

Effetti principali:

Si definisce effetto principale di un esperimento fattoriale la variazione della risposta prodotta dal cambiamento di livelli dei fattori. In questo caso si ha:

$$A = \overline{y}_{A^+} - \overline{y}_{A^-} = \frac{a + ab}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n}[a + ab - b - (1)]$$

Analogamente per il fattore B:

$$B = \overline{y}_{B^+} - \overline{y}_{B^-} = \frac{b + ab}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n}[b + ab - a - (1)]$$

L'interazione tra i due i due fattori è invece calcolata come la differenza tra le medie calcolate sulle diagonali del piano fattoriale:

$$AB = \overline{y}_{A^+} - \overline{y}_{A^-} = \frac{(1) + ab}{2n} - \frac{b + a}{2n} = \frac{1}{2n}[(1) + ab - b - a]$$

I termini tra parentesi quadre sono detti *contrasti*.

Per capire se i due fattori presentano interazione è sufficiente rappresentare nel medesimo grafico le variazioni della risposta dovute al cambiamento di livello di un fattore per entrambi i livelli dell'altro fattore.

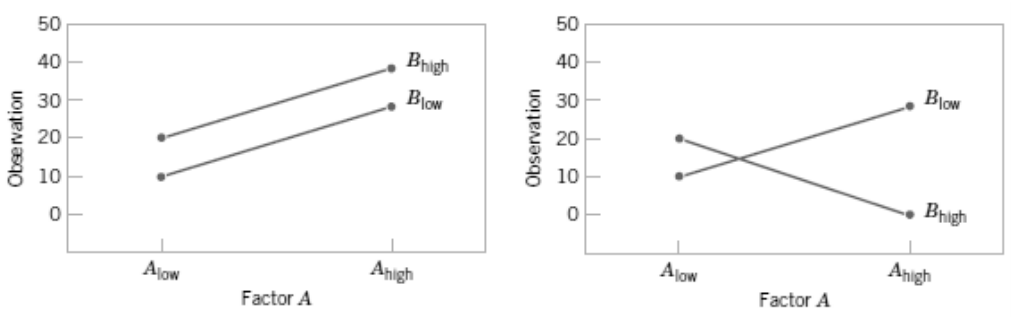

Figura 5.3 Grafici delle variazioni di risposta [35]

In fig. [5.3] sono riportati due casi differenti. Nel primo caso le rette rappresentanti le variazioni di A per entrambi i livelli di B sono parallele, e

questo significa che i due fattori non presentano interazioni in quanto l'effetto di A non dipende dal livello scelto per il fattore B. Nel secondo caso le rette rappresentanti le variazioni di A per entrambi i livelli di B non sono parallele, e questo significa che i due fattori presentano interazioni in quanto l'effetto di A dipende dal livello scelto per il fattore B. Quando l'interazione tra due fattori è grande i corrispondenti effetti principali non sono significativi; questo non deve trarre in inganno. Dunque la conoscenza dell'interazione tra due fattori è più utile della conoscenza dell'effetto principale. A tal proposito risulta evidente che questa metodologia è in grado di individuare le interazioni tra fattori a differenza del metodo "*un fattore per volta"*. Questo prevede di eseguire varie prove variando i livelli di un fattore mantenendo fisso l'altro. In fig. [5.4] è mostrato come questo metodo non permetta di determinare le combinazioni di livelli che ottimizzano il processo in presenza di interazioni.

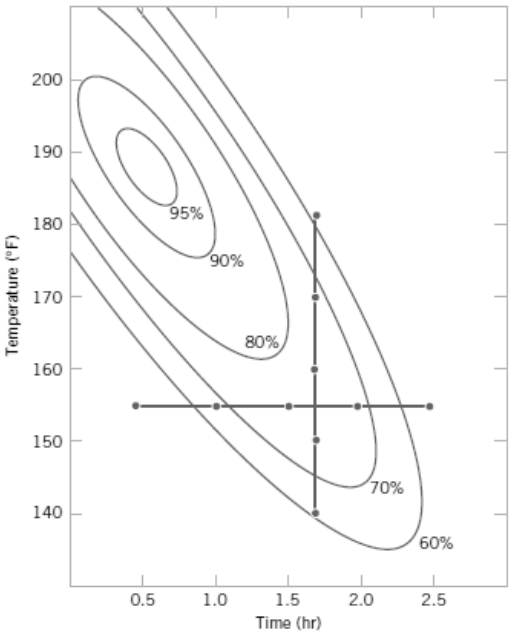

Figura 5.4 Rappresentazione grafica del metodo "prove ed errori" [35]

5.1.2 Piano $2^{\mathbf{k}}$ con $\mathbf{k} \geq 3$

Quanto detto per un piano 2^2 può essere esteso ad un piano 2^k. La rappresentazione grafica del piano assume però un aspetto tridimensionale come mostrato in fig. [5.5].

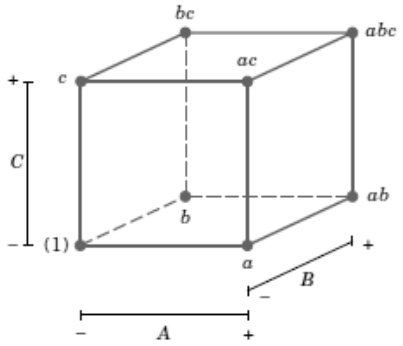

Figura 5.5 Rappresentazione grafica di un piano fattoriale $\mathbf{2^3}$ [35]

Si riportano in fig. [5.6] gli effetti principali e le interazioni.

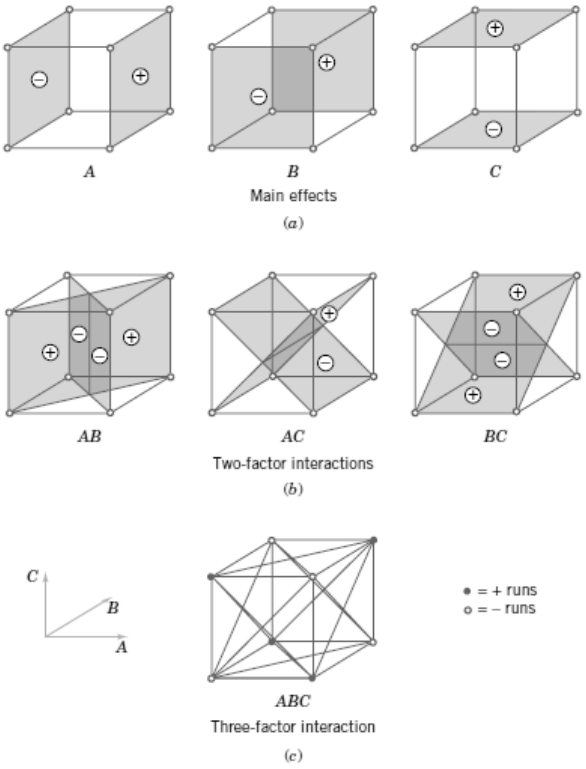

Figura 5.6 Rappresentazione geometrica dei contrasti di un piano fattoriale $\mathbf{2^3}$ [35]

Quando i fattori iniziano ad aumentare in numero, gli effetti principali e gli effetti delle interazioni si ricavano direttamente dalla matrice del piano fattoriale dove sono indicati i segni di ogni combinazione dei livelli dei fattori. Questa si costruisce riportando sulle colonne gli effetti principali e sulle righe le varie

combinazioni dei livelli. Si completano così le colonne degli effetti principali dei fattori riportando il segno del livello del fattore corrispondente al trattamento considerato. I segni degli effetti delle interazioni si ottengono semplicemente moltiplicando i segni degli effetti principali corrispondenti. In fig. [5.7] è mostrata la matrice del piano fattoriale 2^3.

Treatment Combination	Factorial Effect							
	I	*A*	*B*	*AB*	*C*	*AC*	*BC*	*ABC*
(1)	+	−	−	+	−	+	+	−
a	+	+	−	−	−	−	+	+
b	+	−	+	−	−	+	−	+
ab	+	+	+	+	−	−	−	−
c	+	−	−	+	+	−	−	+
ac	+	+	−	−	+	+	−	−
bc	+	−	+	−	+	−	+	−
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

Figura 5.7 Matrice dei segni di un piano fattoriale $\mathbf{2^3}$ per il calcolo dei contrasti [35]

Da questa si ricavano direttamente i contrasti di un effetto moltiplicando il segno della colonna dell'effetto in considerazione per la lettera della combinazione di livelli (prova). Le formule generali per calcolare un effetto sono dunque riportate in tabella [5.1].

Grandezza	Formula
$\boldsymbol{contrasto}$	$\sum_{i=1}^{2^k} prova_i * segno_i \; ; \; per \; ogni \; effetto$
$\boldsymbol{Effetto}$	$\frac{contrasto}{n2^{k-1}}$

Tabella 5.1 Formule per il calcolo degli effetti in un generico piano fattoriale $\mathbf{2^k}$ [35]

5.2 Analisi della varianza

In un esperimento si è soliti definire *fattori* le variabili in ingresso. Ad ogni fattore può essere attribuito un numero arbitrario di valori che prendono il nome di *livelli*. Si consideri un singolo fattore con a livelli e un numero di replicazioni n per ogni livello. L'analisi della varianza consiste in una analisi statistica che ha

lo scopo di verificare l'uguaglianza delle medie delle a popolazioni. E' possibile descrivere le osservazioni ottenute, ovvero le risposte del sistema dovute alle variazioni dei livelli, con un modello statistico lineare:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1,2,\dots,a \\ j = 1,2,\dots,n \end{cases}$$

dove:

$y_{ij} = variabile\ casuale\ che\ genera\ l'osservazione\ di\ posizione\ (i,j)$

$\mu = componente\ comune\ a\ tutti\ i\ livelli$

$\tau_i = componente\ dovuta\ all'i-esimo\ livello$

$\varepsilon_{ij} = componente\ di\ errore\ casuale$

Si assume che gli errori ε_{ij} siano indipendenti e aventi una distribuzione normale di media nulla e varianza σ^2, ovvero $N(0,\sigma^2)$. Questo modello permette dunque di considerare ogni livello come una popolazione statistica avente media μ e varianza σ^2. Se le singole prove vengono eseguite in ordine casuale allora l'esperimento è definito *completamente randomizzato*. Ogni livello ha dunque un effetto che lo contraddistingue indicato con τ_i e che viene generalmente definito come deviazione dalla media μ. Di conseguenza risulta:

$$\sum_{i=1}^{a} \tau_i = 0$$

Per verificare dunque l'uguaglianza delle medie degli a livelli è necessario verificare le seguenti ipotesi equivalenti:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \cdots = \tau_n = 0$$

$H_1: \tau_1 \neq 0$ per almeno due trattamenti

H_0 e H_1 prendono rispettivamente il nome di *ipotesi nulla* e *ipotesi alternativa*. Dunque se l'ipotesi nulla è vera ogni osservazione è costituita dalla media μ più la componente di errore casuale ε_{ij} che equivale a dire che tutte le prove sono state estratte da una distribuzione normale con media μ e varianza σ^2. In conclusione si può affermare che se l'ipotesi nulla è verificata, cambiando i livelli del fattore non vi è nessun effetto sulla risposta media.

5.2.1 Determinazione dei test statistici

Per verificare l'ipotesi nulla si considerino le seguenti grandezze che permettono di eseguire un confronto statistico tra i livelli. La variabilità di una osservazione può essere espressa mediante il quadrato della differenza tra l'osservazione stessa e la media delle osservazioni totali. La variabilità totale dei dati è dunque:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}\right)^2$$

dove $\bar{y}$ è la media delle osservazioni totali:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}}{N}$$

con $N = an$.

La variabilità totale (5.7) può essere scomposta in due componenti:

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}\right)^2 = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left[\left(\bar{y_i} - \bar{y}\right) + \left(y_{ij} - \bar{y_i}\right)\right]^2 =$$

$$= n\sum_{i=1}^{a}(\bar{y_i} - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y_i}\right)^2 + 2\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(\bar{y_i} - \bar{y})\left(y_{ij} - \bar{y_i}\right)$$

dove $\bar{y_i}$ rappresenta la media delle osservazioni del livello i-esimo:

$$\overline{y_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} y_{ij}}{n}$$

Il doppio prodotto è pari a zero. Infatti:

$$\sum_{j=1}^{n} \left(y_{ij} - \overline{y_i}\right) = y_{i.} - n\overline{y_i} = y_{i.} - y_{i.} = 0$$

dove $y_{i.}$ rappresenta la somma delle osservazioni del livello i-esimo:

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^{n} y_{ij}$$

In definitiva si ottiene:

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} \left(y_{ij} - \overline{y}\right)^2 = n\sum_{i=1}^{a} (\overline{y_i} - \overline{y})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} \left(y_{ij} - \overline{y_i}\right)^2$$

Il significato di quest'ultima espressione è che la variabilità totale dei dati è composta rispettivamente dalla somma dei quadrati delle differenze tra le medie dei livelli e la media generale e la somma dei quadrati delle differenze tra le osservazioni di un livello e la media dello stesso livello, ovvero in simboli:

$$SS_T = SS_{livelli} + SS_E$$

I due termini assumono rispettivamente le definizioni di *devianza tra livelli* e *devianza residua*. Si consideri ora l'identità seguente che indica il valore atteso della somma dei quadrati dei livelli:

$$SS_{livelli} = (a-1)\sigma^2 + n\sum_{i=1}^{a} {\tau_i}^2$$

Se l'ipotesi nulla è verificata allora la varianza sarà:

$$\frac{SS_{livelli}}{(a-1)} = \sigma^2$$

Questo rapporto prende il nome di *media dei quadrati dei trattamenti*. In simboli:

$$MS_{livelli} = \frac{SS_{livelli}}{(a-1)}$$

Di conseguenza se H_0 è verificata, $MS_{livelli}$ permette di stimare la varianza σ^2 senza alterazioni mentre se H_0 non è verificata, $MS_{livelli}$ risulta una stima della varianza σ^2 più un termine che rappresenta la variabilità dovuta alla differenza tra le medie dei livelli. Dato che il valore atteso della somma dei quadrati degli errori è:

$$SS_E = a(n-1)\sigma^2$$

si può definire la *media dei quadrati degli errori*:

$$MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)}$$

Questo significa che MS_E è una stima della varianza σ^2 senza alterazioni in entrambi i casi in cui l'ipotesi nulla sia verificata o meno. E' possibile effettuare anche una suddivisione dei corrispondente gradi di libertà:

$$an - 1 = a - 1 + a(n-1)$$

Si introduce ora l'ipotesi che ciascuno degli a livelli sia descritto da una distribuzione normale. Nel caso di ipotesi nulla verificata, il rapporto tra $MS_{livelli}$ e MS_E ha una distribuzione F con $a-1$ e $a(n-1)$ gradi di libertà:

$$F_0 = \frac{\frac{SS_{livelli}}{(a-1)}}{\frac{SS_E}{a(n-1)}} = \frac{MS_{livelli}}{MS_E}$$

F_0viene definito *test statistico* in quanto permette di verificare o meno l'ipotesi nulla. Infatti se H_0 non è verificata $MS_{livelli}$ è maggiore di σ^2 ovvero del numeratore di F_0. Si riportano in tabella [5.2] le grandezze necessarie ad eseguire l'analisi della varianza.

Fonte di variazione	Somma dei quadrati	Gradi di libertà	Quadrato della media	F_0
Livelli	$SS_{livelli}$	$(a-1)$	$MS_{livelli} = \frac{SS_{livelli}}{(a-1)}$	$MS_{livelli}/MS$
Errore	SS_E	$a(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)}$	
Totale	SS_T	$an-1$		

Tabella 5.2 Grandezze necessarie per l'analisi della varianza [35]

In tabella [5.3] sono riportate invece le formule per calcolare le somme dei quadrati necessarie per sviluppare l'ANOVA.

Grandezza	Formula
$\boldsymbol{SS_{livelli}}$	$\frac{(contrasto)^2}{n2^k}$
$\boldsymbol{SS_E}$	$SS_T - SS_{livelli}$

Tabella 5.3 Formule per il calcolo delle somme dei quadrati [35]

5.2.2 Verifica dell'ipotesi nulla

In conclusione bisogna rifiutare H_0 se il test statistico F_0 è maggiore del valore $f_{\alpha,(a-1),a(n-1)}$ che definisce la coda superiore della distribuzione $F_{(a-1),a(n-1)}$, assegnato un certo livello di significatività α (Tab. [5.4]).

Verifica delle ipotesi	
Rifiuto $\boldsymbol{H_0: \tau_1 = \tau_2 = \cdots = \tau_n = 0}$ *se*	$F_0 > f_{\alpha,(a-1),a(n-1)}$

Tabella 5.4 Relazione per la verifica dell'ipotesi nulla mediante $\boldsymbol{F_0}$ *[35]*

I valori assunti da questa distribuzione sono riportati in apposite tabelle.

In fig. [5.8] sono rappresentate varie distribuzioni F per differenti gradi di libertà.

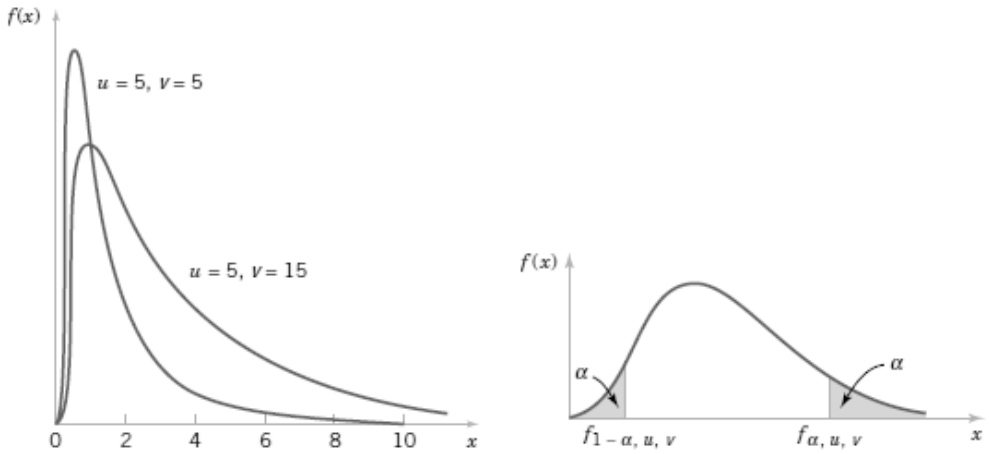

Figura 5.8 Distribuzione dei test statistici e significatività [35]

Alternativamente è possibile calcolare la probabilità che la variabile casuale F_0 superi il valore $f_{\alpha,(a-1),a(n-1)}$. La probabilità di appartenere alla coda della distribuzione è data dal seguente integrale.

$$P = \int_{f_{\alpha,(a-1),a(n-1)}}^{\infty} f(x)dx = \alpha$$

Dunque la verifica dell'ipotesi nulla H_0 si riduce a confrontare P_0 con α: se P_0 è minore di α l'ipotesi nulla è rifiutata (tab. [5.5]).

Verifica delle ipotesi	
Rifiuto $\boldsymbol{H_0: \tau_1 = \tau_2 = \cdots = \tau_n = 0}$ *se*	$P_0 < \alpha$

Tabella 5.5 Relazione per la verifica dell'ipotesi nulla mediante $\boldsymbol{P_0}$ *[35]*

5.2.3 Verifica delle ipotesi sul modello

Dato che è stata assunta una distribuzione normale degli errori è necessario verificare tale ipotesi. Per farlo è sufficiente calcolare i residui di tutte le osservazioni e rappresentarli in un grafico di probabilità normale. Il residuo di

una osservazione y_{ij} qualsiasi è la differenza tra l'osservazione y_{ij} stessa e la media del livello i-esimo del fattore:

$$e_{ij} = y_{ij} - \overline{y_i}$$

Un esempio è riportato in figura [5.9].

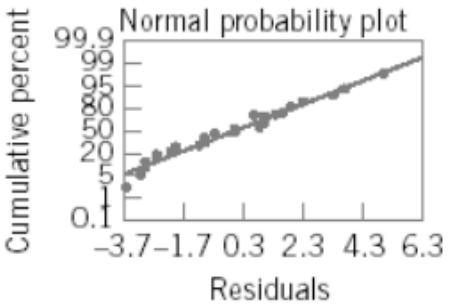

Figura 5.9 Grafico di probabilità normale dei residui [35]

Inoltre è necessario anche verificare l'ipotesi che gli errori abbiano la stessa varianza σ^2 per ogni livello del fattore. Per fare questo bisogna rappresentare i residui per ogni livello del fattore rispetto ai livelli del fattore e confrontare le ampiezze delle dispersioni come in fig. [5.10].

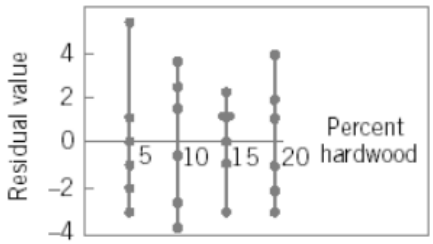

Figura 5.10 Grafico dei residui per ogni livello di un generico fattore [35]

5.3 Analisi della varianza per un esperimento fattoriale

L'analisi della varianza può essere estesa dunque per verificare la significatività dei fattori e le interazioni tra questi. Si estende dunque l'analisi della varianza ad un piano fattoriale 2^k. Per semplicità di notazione si considera un piano 2^3. Il modello per descrivere la singola osservazione diviene:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk}$$
$$+ \varepsilon_{ijkl} \begin{cases} i = 1,2,\dots,a \\ j = 1,2,\dots,b \\ k = 1,2,\dots,c \\ l = 1,2,\dots,n \end{cases}$$

dove:

$y_{ij} = variabile\ casuale\ che\ genera\ l'osservazionedi\ posizione\ (i,j)$

$\mu = componente\ comune\ a\ tutti\ i\ livelli$

$\tau_i, \beta_j, \gamma_k = componenti\ dovute\ ai\ livelli$

$(\tau\beta)_{ij}, (\tau\gamma)_{ik}, (\beta\gamma)_{jk} = comp.dovute\ all'interazione\ tra\ i\ livelli\ di\ 2\ fattori$

$(\tau\beta\gamma)_{ijk} = componente\ dovuta\ all'interazione\ tra\ i\ livelli\ di\ 3\ fattori$

$\varepsilon_{ijkl} = componente\ di\ errore\ casuale$

Dunque oltre ai tre effetti principali sono presenti anche gli effetti di tre interazioni a due fattori e di una interazione a tre fattori.

Per la componente di errore valgono le stesse ipotesi fatte precedentemente.

5.3.1 Determinazione dei test statistici per un piano fattoriale

La somma dei quadrati può essere scomposta in simboli nel modo seguente:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} + SS_E$$

dove per calcolare le somme dei quadrati si ricorre sempre alla formula:

$$SS = \frac{(contrasto)^2}{n2^k}$$

La tabella [5.6] riporta tutte le grandezze per svolgere l'analisi della varianza di un piano fattoriale 2^3.

Effetti	Somma dei quadrati	Gradi di libertà	Quadrato della media	F_0
A	SS_A	$(a-1)$	$MS_A = \frac{SS_A}{(a-1)}$	MS_A/MS_E
B	SS_B	$(b-1)$	$MS_B = \frac{SS_B}{(b-1)}$	MS_B/MS_E
C	SS_C	$(c-1)$	$MS_C = \frac{SS_C}{(c-1)}$	MS_C/MS_E
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	MS_{AB}/MS_E
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	$MS_{AC} = \frac{SS_{AC}}{(a-1)(c-1)}$	MS_{AC}/MS_E
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	$MS_{BC} = \frac{SS_{BC}}{(b-1)(c-1)}$	MS_{BC}/MS_E
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	$MS_{ABC} = \frac{SS_{ABC}}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	MS_{ABC}/MS_E
Errore	SS_E	$abc(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{abc\,(n-1)}$	
Totale	SS_T	$abcn-1$		

Tabella 5.6 Grandezze necessarie per l'analisi della varianza di un piano fattoriale $\mathbf{2^3}$ [35]

In presenza di tanti fattori i calcoli possono essere svolti da un software, ad esempio Minitab ®.

5.3.2 Verifica dell'ipotesi nulla per un piano fattoriale

Le ipotesi da verificare in questo caso sono riportate in tabella [5.7]:

Verifica delle ipotesi	
Rifiuto $\mathbf{H_0}$: $\boldsymbol{\tau_1 = \tau_2 = \cdots = \tau_a = 0}$ *se*	$F_0 > f_{\alpha,(a-1),abc\,(n-1)}$
Rifiuto $\boldsymbol{H_0}$: $\boldsymbol{(\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \cdots = (\tau\beta)_{ab} = 0}$ *se*	$F_0 > f_{\alpha,(a-1)(b-1),abc\,(n-1)}$
Rifiuto $\boldsymbol{H_0}$: $\boldsymbol{(\tau\beta\gamma)_{111} = (\tau\beta\gamma)_{112} = \cdots = (\tau\beta\gamma)_{abc} = 0}$ *se*	$F_0 > f_{\alpha,(a-1)(b-1)(c-1),abc\,(n-1)}$

Tabella 5.7 Relazioni per la verifica dell'ipotesi nulla mediante $\mathbf{F_0}$ [35]

Queste ipotesi sono da estendere anche agli altri fattori semplicemente sostituendo le corrispondenti lettere greche. Anche in questo caso è possibile utilizzare alternativamente il valore P_0, corrispondente a F_0.

Rifiutare l'ipotesi nulla equivale a dire che i fattori hanno un effetto significativo o che vi è interazione tra i fattori.

6 Progettazione dello stampo

La fase di progettazione di uno stampo per il micro stampaggio a iniezione prevede generalmente l'integrazione tra i requisiti tecnologici per la realizzazione della cavità dello stampo e quelli per la produzione del componente. Uno dei costi principali del processo produttivo è rappresentato dallo stampo. Nell'ambito della ricerca questo aspetto risulta essere ancora più rilevante in quanto non è possibile recuperare il costo dello stampo con una produzione del componente su larga scala. Per questo motivo lo stampo è generalmente composto da un insieme di elementi fissi mentre la cavità viene alloggiata su un inserto rimuovibile.

6.1 Stampo

Gli stampi per il micro stampaggio a iniezione sono simili a quelli dello stampaggio a iniezione tradizionale. Questi sono generalmente composti da una parte fissa e da una mobile. Generalmente il "maschio" è collocato sull'unità di chiusura. Il componente è separato dallo stampo attraverso il sistema di estrazione che è collocato sulla parte mobile. E' per questo motivo che generalmente il "maschio" si trova sulla parte mobile. Il sistema di estrazione della Wittmann Battenfeld MicroPower è controllato da un servomotore elettrico. Questo mette in movimento il perno avvitato sul carrello estrattori (fig. [6.1]).

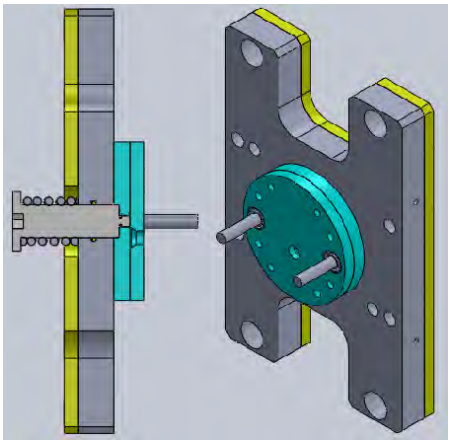

Figura 6.1 Carrello estrattori con relativa sezione

Sul perno è inserita una molla che permette il ritorno dell'estrattore. I perni visibili in fig. [6.1] sono le guide del carrello estrattori (azzurro). Il movimento del carrello estrattori è permesso da due cuscinetti a sfera. Il foro centrale sulla piastra esterna del carrello estrattori è invece l'alloggiamento dell'estrattore. L'accoppiamento è di tipo geometrico. L'estrattore è infatti cilindrico a testa conica. Il carrello estrattori è contenuto in una struttura rettangolare sulla quale poggia la piastra per il riscaldamento dello stampo. Su questa piastra sono presenti dei fori dove vengono inserite le resistenze termiche. Sopra questa piastra è presente un'altra piastra sulla quale sono presenti i canali di raffreddamento e sulla quale è montata la struttura porta inserto (fig. [6.2]).

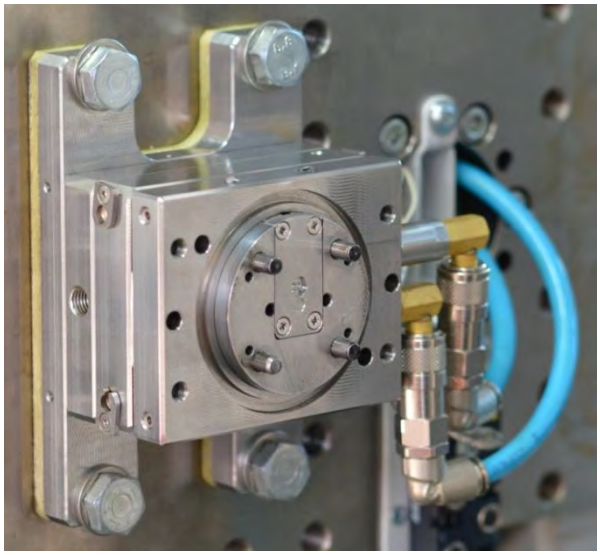

Figura 6.2 Stampo utilizzato in questo lavoro

Sulla zona porta inserto sono presenti quattro colonnine per il centraggio della parte mobile su quella fissa. La parte mobile della Wittmann Battenfeld MicroPower è montata su una tavola rotante.

6.2 Inserto

Nel micro stampaggio a iniezione le cavità hanno tolleranze dimensionali strette e spesso sono richieste finiture superficiali spinte. Le cavità vengono realizzate su inserti intercambiabili per aumentare la versatilità dello stampo e semplificare il processo di lavorazione, oltre per i già citati motivi di costo. Il materiale

utilizzato per realizzare gli inserti è un AISI 420. La durezza e la resistenza all'attrito di questo acciaio permettono un controllo ottimale del processo di micro fresatura (forze generate e vibrazioni) e garantiscono una resistenza strutturale ai pin sufficiente durante il processo d'iniezione (pressione e stress termici). Dato che l'obiettivo di questa tesi è l'analisi dell'influenza della finitura superficiale della cavità sulle forze di estrazione è stato scelto di lavorare l'inserto mediante micro fresatura in modo da avere un controllo preciso sulla rugosità. Per questo motivo sono stati realizzati due inserti aventi la medesima cavità ma lavorati con differenti parametri di processo al fine di ottenere due rugosità superficiali differenti.

La progettazione della cavità ha tenuto in considerazione i seguenti vincoli:

1. Dimensioni dell'inserto;
2. Riempimento della cavità;
3. Deformazioni del componente;
4. Distribuzione delle tensioni durante la fase d'estrazione;
5. Realizzabilità alle macchine utensili;
6. Possibilità di misurare le forze d'estrazione.

Tutti questi vincoli hanno un elevato grado d'interazione.

6.2.1 Definizione della geometria della cavità

L'ingombro massimo della cavità è dato dal volume massimo iniettabile dalla pressa, pari a $1\ cm^3$. Un altro vincolo geometrico è dato dall'estensione della superficie lavorabile dell'inserto e ovviamente dalla sua profondità massima. Queste sono rispettivamente pari a: $S = 6{,}7 * 31\ mm^2$ e $H = 5\ mm$. La geometria è stata definita inizialmente per mettere in risalto la criticità osservata

durante la fase di estrazione dei dispositivi microfluidici. Si è scelto dunque di realizzare una cavità con quattro pin cilindrici aventi un elevato aspect ratio (rapporto tra il diametro del pin e la sua altezza), pari a 1,875, ma tali anche da avere una superficie totale sufficiente da rendere la forza d'estrazione misurabile. Il lato superiore dell'inserto è riportato in fig. [6.3].

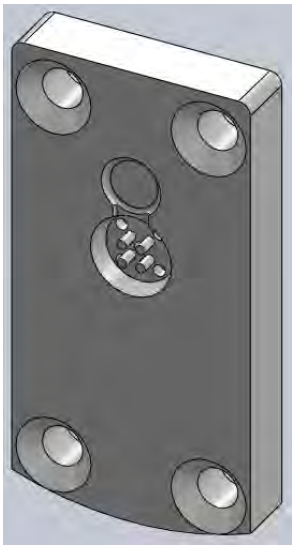

Figura 6.3 Lato superiore dell'inserto

In fig. [6.4] è riportato invece il lato inferiore.

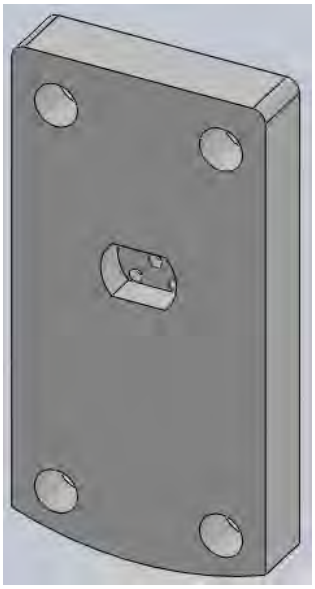

Figura 6.4 Lato inferiore dell'inserto

I pin sono disposti in modo tale da non ostacolare eccessivamente il flusso del polimero all'ingresso della cavità. Inoltre la configurazione scelta dei pin dell'estrattore garantisce una distribuzione delle forze d'estrazione omogenea sulla superficie dei pin della cavità. In questo modo si evita che il pezzo si impunti in uscita alterando l'effetto della finitura superficiale per via di una distribuzione della pressione non uniforme. Questi aspetti sono stati analizzati mediante simulazione numerica. Sul retro della cavità è presente inoltre una tasca sagomata tale da favorire l'accoppiamento con l'estrattore e da evitare che i pin siano sottoposti a sforzi torsionali. La profondità della guida deve essere sufficiente per permettere all'estrattore una corsa almeno pari alla profondità della cavità. In questo modo è possibile estrarre il componente dalla cavità. Questo aspetto ha rappresentato un ulteriore vincolo alla progettazione dell'inserto nella definizione della profondità della cavità condizionando tutti gli altri aspetti ad essa legati (aspect ratio, superficie totale).

6.2.2 Simulazioni Moldflow

La simulazione numerica è uno strumento fondamentale per l'ottimizzazione della geometria della cavità e delle variabili di processo. Nel micro stampaggio a iniezione è necessario determinare i valori dei parametri che influenzano maggiormente la qualità del prodotto, come ad esempio la temperatura del fuso e la pressione di mantenimento, in modo da assicurare le specifiche di progetto. Le simulazioni numeriche vengono eseguite mediante software che implementano le equazioni che descrivono il flusso del polimero e lo scambio termico tra questo e lo stampo [36]:

1. *Equazione di continuità*: eseguendo un bilancio della massa in condizioni stazionarie si ottiene:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = 0$$

ovvero:

$$\nabla(\rho\bar{u}) = 0$$

dove ρ è la densità del fluido e $\bar{u}$ il vettore delle velocità. Un polimero fuso non è un fluido incomprimibile (curve pvt) però le variazioni di volume rispetto alle variazioni di pressione durante il processo non sono abbastanza significative da influenzare il campo di moto. Dunque l'equazione precedente può essere semplificata a:

$$\nabla(\bar{u}) = 0$$

2. *Equazione dei momenti*:

$$\sum f = m\bar{a}$$

Risolvendo questa equazione si ottiene:

$$\rho\frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu\nabla^2\bar{u} + \rho g$$

dove ρ è la densità del fluido, $\bar{u}$ è il vettore delle velocità, p la pressione e μ la viscosità dinamica. Questa espressione è nota come equazione di Navier-Stokes.

3. *Equazione dell'energia*: l'equazione di Fourier per lo scambio termico è:

$$q_i = -k_i\frac{\partial T}{\partial x_i}$$

Risolvendo questa equazione si ottiene:

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p\bar{u}\nabla\mathrm{T} = \nabla(\mathrm{k}\nabla\mathrm{T}) + \phi$$

dove T è la temperatura, C_p è il calore specifico, ρ è la densità del fluido, $\bar{u}$ è il vettore delle velocità, k è la conduttività termica e ϕ è la dissipazione termica.

Gli scopi principali per cui viene eseguita una simulazione numerica sono [16]:

1. Visualizzazione del flusso di riempimento nella cavità dello stampo. E' possibile individuare i difetti che si verificano nell'ultima zona della cavità che viene riempita come ad esempio linee di giunzione, vuoti o mancati riempimenti.;

2. Ottimizzazione della progettazione dello stampo prima della sua realizzazione per prevenire i costi di una eventuale nuova realizzazione. Infatti è possibile simulare diverse geometrie, sistemi di alimentazione e iniezione;

3. Simulare le condizioni termiche del flusso durante il riempimento della cavità e durante il raffreddamento per stimare il tempo ciclo ed individuare le aree critiche che possono portare ad avere deformazioni sensibili;

4. Per stimare le condizioni del componente terminato il processo come ad esempio tensioni residue, ritiro volumetrico e deformazioni. Infatti nel micro stampaggio il materiale è soggetto inizialmente ad elevate pressioni e temperature e successivamente ad una rapida diminuzione di entrambi i parametri;

5. Aiutare la sperimentazione e la programmazione degli esperimenti per determinare i parametri di maggior influenza sulla qualità del prodotto.

In questa tesi è stato utilizzato il software Autodesk Simulation Moldflow Synergy ®. La prima fase di una simulazione numerica consiste nell'eseguire la

mesh del modello solido. Nel caso di micro componenti è consigliabile utilizzare mesh 3D dato che il rapporto tra le dimensioni principali è generalmente elevato. Eseguita la mesh si procede determinando il posizionamento ideale del gate. Per eseguire un'analisi completa di riempimento, impaccamento e raffreddamento è necessario progettare il sistema di alimentazione e quello di raffreddamento. Da questo tipo di analisi è possibile stimare il ritiro e le deformazioni. Facendo variare i parametri di processo ed eseguendo nuove simulazioni è possibile osservare la loro influenza sulla qualità del prodotto. E' possibile infatti individuare i fattori che maggiormente influenzano la deformazione dato che il software scompone il valore stimato in tre componenti dovute rispettivamente al ritiro differenziale, all'orientazione e al raffreddamento.

In questo lavoro è stata effettuata una simulazione numerica per verificare che il riempimento della cavità non generasse difettosità tali da compromettere la misura della forza d'estrazione. Inoltre si sono stimate le deformazioni e il ritiro. Con i valori di ritiro volumetrico ottenuti si sono successivamente stimate le forze di estrazione adattando un modello analitico per geometrie semplici alla geometria progettata [25]. Per eseguire le simulazioni è stato necessario ricavare il modello CAD 3D del componente da quello dell'inserto. In SolidWorks® è possibile eseguire questa operazione realizzando per prima cosa un elemento rettangolare che comprenda tutta la cavità. Per fare questo è sufficiente utilizzare la funzione *"Estrudere"* e deselezionare l'opzione *"unisci risultato"* nel property manager. Successivamente bisogna utilizzare la funzione *"Abbina"* per ricavare il negativo della cavità dall'estruso. Nel property manager di questa funzione è sufficiente scegliere come tipo di operazione *"sottrarre"* e selezionare i due oggetti. Il modello ottenuto è stato poi salvato con un nome diverso. Il file è stato successivamente salvato in formato IGES per poterlo caricare nel software Autodesk Simulation Moldflow Synergy ®. In questo caso è stata utilizzata una mesh 3D. La dimensione degli elementi della mesh deve garantire almeno una corrispondenza con l'oggetto reale del 90% per ottenere risultati affidabili.

Le caratteristiche della mesh sono riportate in tabella [6.1].

Caratteristiche della mesh del componente	
Tipo di mesh	*3D*
Numero di elementi	*617319*
Lunghezza bordo globale	*0,15 mm*
Tolleranza d'unione	*0.1 mm*
Attiva controllo dell'altezza corda	*Si*
Altezza corda	*0.1 mm*
N° minimo di elementi attraverso lo spessore	*6*
Lunghezza massima consentita del bordo attraverso lo spessore	*0.5710 mm*
Usa ottimizzazione della maglia di superficie	*Si*
Usa corrispondenza della maglia di superficie	*Si*
Controllo automatico del rapporto di forma del tetraedro	*Si*

Tabella 6.1 Parametri principali della mesh

La rappresentazione grafica della mesh è riportata in fig. [6.5].

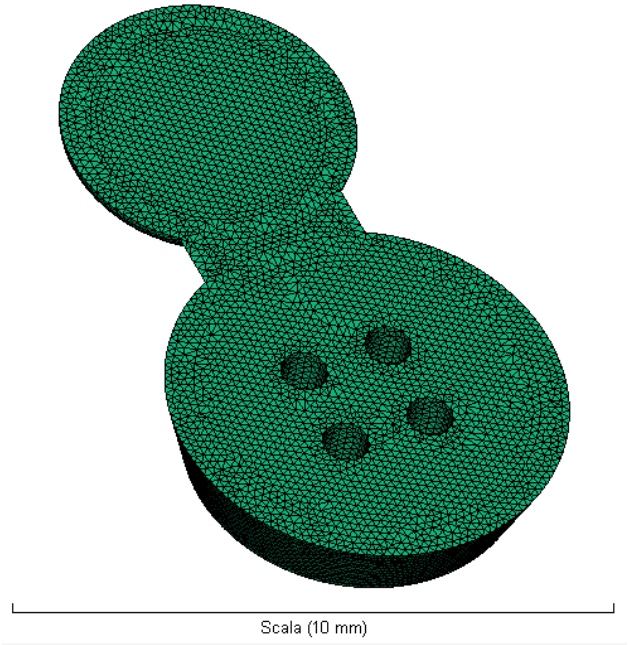

Figura 6.5 Mesh del componente

Eseguita la mesh si sono impostate delle condizioni di processo generiche. Per avere un comportamento reale del riempimento si è impostato un gate di dimensioni pari a quelle dell'ugello: 5 mm.

Il materiale utilizzato è: TOTAL PS 1541

I parametri di processo utilizzati sono:

- $Q = 11.8\ \frac{cm^3}{s}$ (valore massimo raggiungibile dalla macchina);
- $P_{Holding} = 0.8 * P_{s-o}$ (pressione di mantenimento pari all' 80% della pressione al punto di commutazione);
- $T_{Melt} = 235\ °C$;
- $T_{Mould} = 60\ °C$.

L'analisi di riempimento non ha evidenziato alcun problema: il fronte di flusso è costante. La cavità viene riempita in 0.0046 s. In fig. [6.6] è riportata una rappresentazione del fronte di flusso.

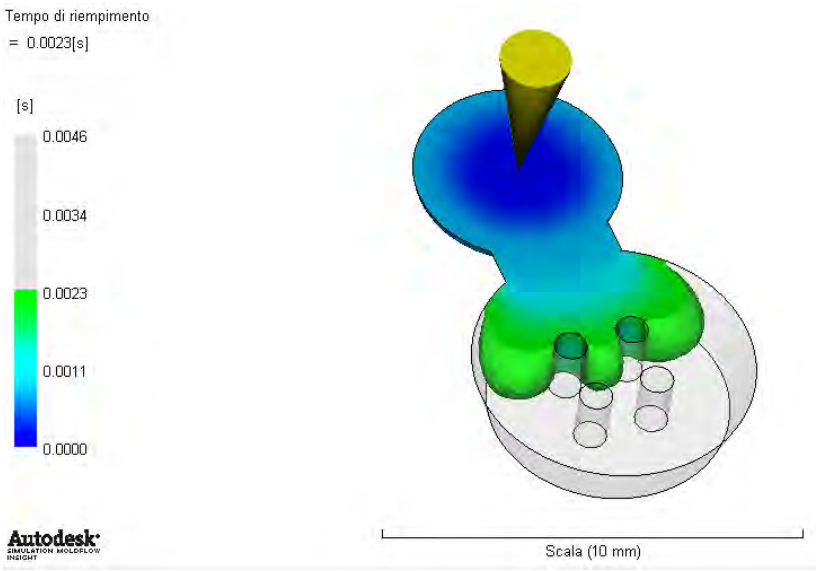

Figura 6.6 Fronte di flusso durante la simulazione di riempimento del componente

Anche l'analisi delle deformazioni non ha messo in evidenza problematiche rilevanti. L'aspetto dell'analisi delle deformazioni che interessa maggiormente è l'uniformità dei valori stimati nella zona dei pin della cavità. Infatti per non influenzare sensibilmente l'analisi dell'influenza della rugosità superficiale sulle forze d'estrazione è necessario avere condizioni omogenee ed evitare deformazioni elevate.

Il valore massimo stimato delle deformazioni è: $\delta_{max} = 31\ \mu m$. Inoltre la zona intorno ai fori ha deformazioni abbastanza omogenee con valori che variano da $10\ \mu m$ a $20\ \mu m$. In fig. [6.7] è riportata l'analisi delle deformazioni.

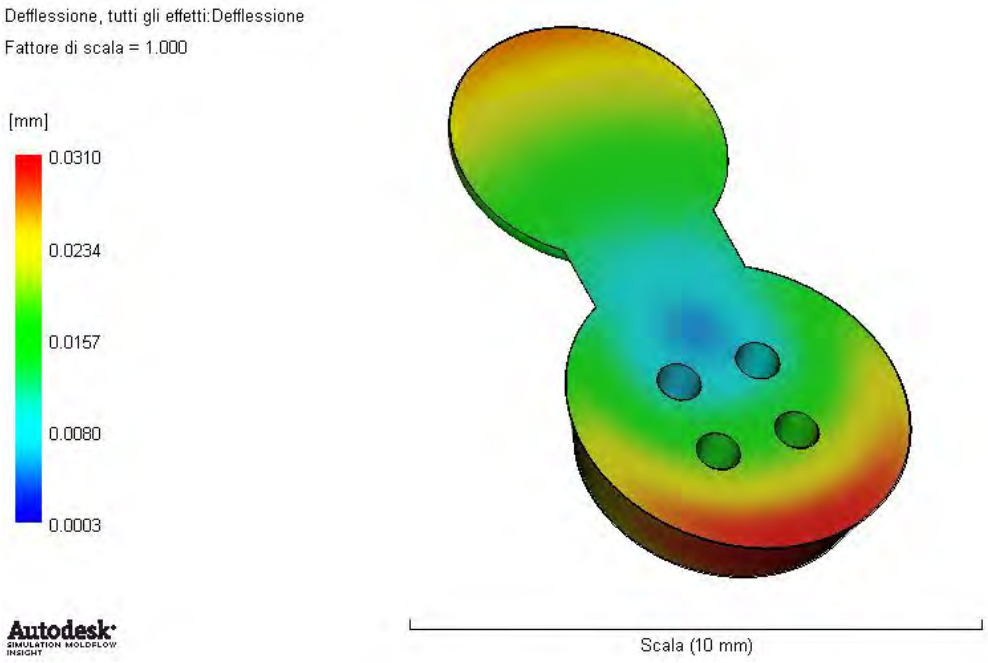

Figura 6.7 Analisi delle deformazioni del componente. Caso 1

Valori simili di deformazione assoluta sono stati ottenuti con altri valori di portata:

- $Q = 1.96\ \frac{cm^3}{s}$

I nuovi risultati sono riportati in fig. [6.8]

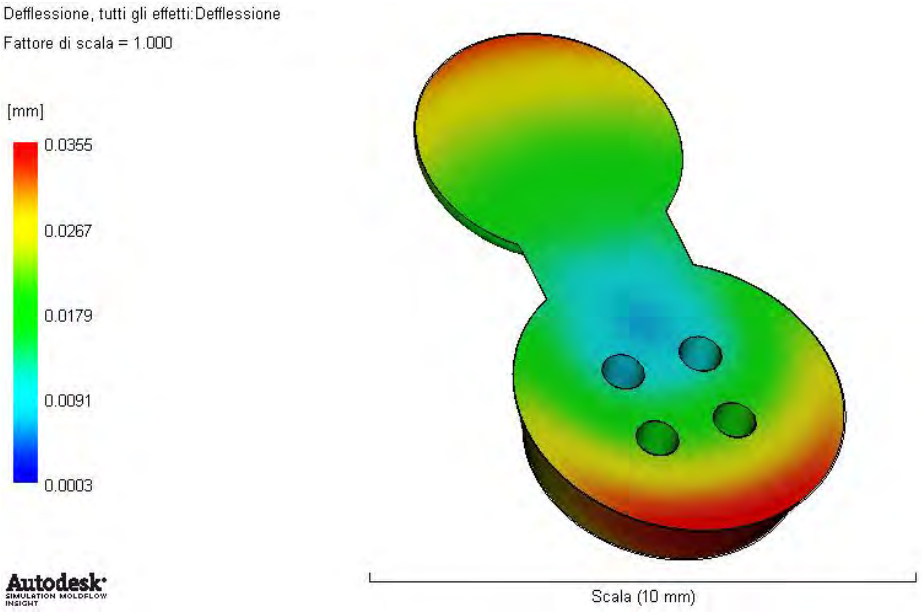

Figura 6.8 Analisi delle deformazioni del componente. Caso 2

Il nuovo valore massimo è $\delta_{max} = 35.5\ \mu m$, ovvero si è verificata una variazione del 14.5 % per una riduzione della portata pari al 87.5 %. Di conseguenza la deformazione non è un problema se i livelli dei fattori vengono scelti non eccessivamente differenti. Anche la distribuzione è del tutto analoga. L'analisi del ritiro volumetrico è mostrata in fig. [6.9].

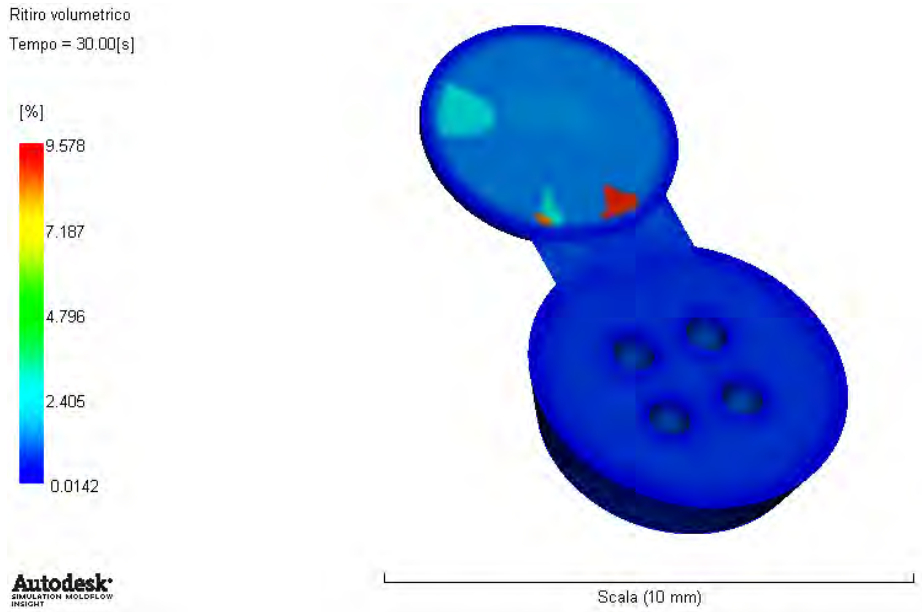

Figura 6.9 Ritiro volumetrico del componente. Caso 1

Si sono successivamente ricavati i valori utili a stimare la forza d'estrazione. Il ritiro volumetrico osservato lungo l'altezza dei pin presenta un andamento pressoché parabolico (fig. [6.10]).

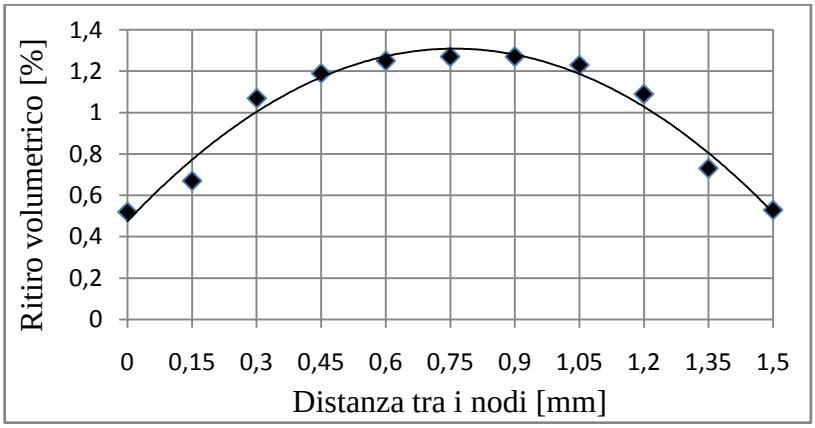

Figura 6.10 Andamento del ritiro volumetrico lungo l'altezza dei pin sulla superficie interna

In tabella [6.2] sono riportati i valori misurati su uno dei quattro fori del componente.

Valori del ritiro volumetrico lungo l'altezza di un pin	
Nodo	**Ritiro %**
N1970	0,53
N2089	0,73
N2078	1,09
N2077	1,23
N2076	1,27
N2075	1,27
N2074	1,25
N2073	1,19
N2122	1,07
N2088	0,67
N1969	0,52

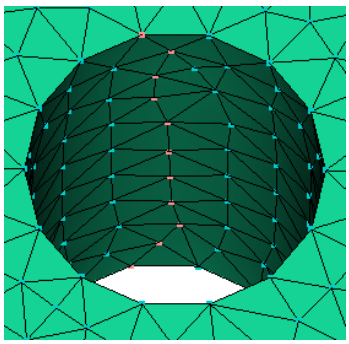

Tabella 6.2 Valori del ritiro volumetrico misurati lungo l'altezza dei pin

L'andamento del ritiro ad una distanza radiale fissata è all'incirca costante come mostrato in fig. [6.11].

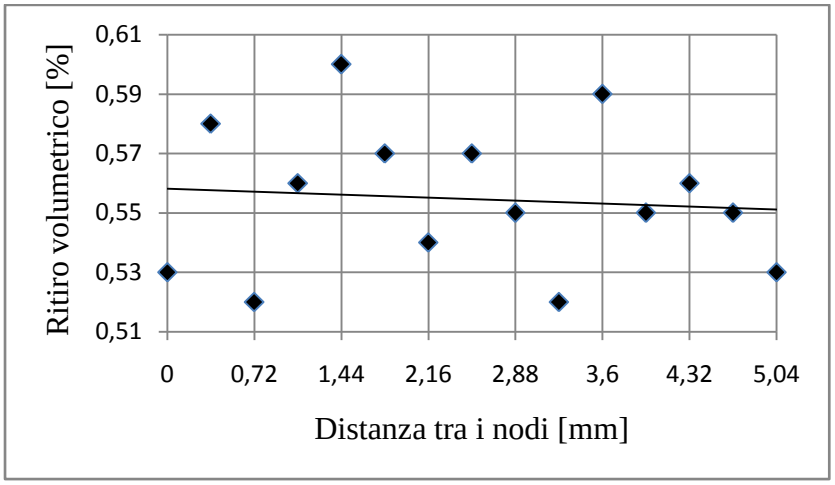

Figura 6.11 Andamento del ritiro volumetrico lungo la circonferenza interna dei pin

Questo ha permesso di considerare l'andamento di pressione precedentemente determinato lungo una generatrice valido su tutta la superficie interna dei fori. Il valore medio ricavato è 0.55%. Il fatto che l'andamento non sia perfettamente orizzontale, nonostante i valori non subiscano grandi variazioni, può essere attribuito al fatto che i nodi della mesh utilizzati per verificare questo andamento non appartenevano effettivamente alla medesima circonferenza. Questo aspetto è dovuto alla natura tetraedrica degli elementi che costituiscono la mesh. Infine l'andamento del ritiro in direzione radiale ha andamento lineare come mostrato in fig. [6.12].

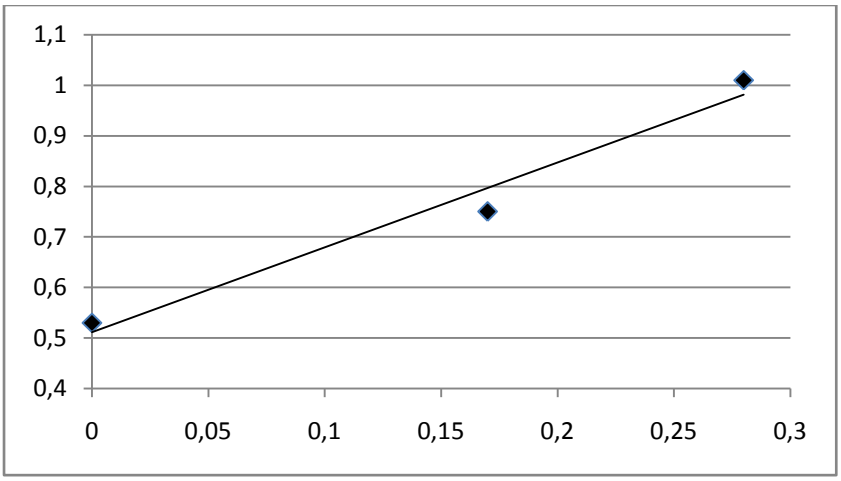

Figura 6.12 Andamento del ritiro volumetrico in direzione radiale

In tabella [6.3] sono riportati i valori misurati su uno dei quattro fori del componente.

Valori del ritiro volumetrico in direzione radiale	
Nodo	**Ritiro %**
N1970	0,53
N2089	0,73
N2078	1,09

Tabella 6.3 Valori del ritiro volumetrico misurati lungo l'altezza dei pin

Valori simili sono stati misurati sugli altri fori potendo definendo così che l'andamento della pressione sui pin sia il medesimo.

6.2.3 Stima della forza di estrazione

Dall'analisi del ritiro volumetrico è stata effettuata una stima della forza di estrazione adattando il modello analitico descritto nel paragrafo 4.5.1. Una stima della forza è necessaria per la scelta del sistema di misura appropriato e per una sua verifica. Per poter applicare il modello analitico si sono considerati i fori separatamente, estraendo dalla geometria del componente quattro cilindretti sui quali l'andamento del ritiro si è visto essere il medesimo. Dunque la forza di estrazione è stata stimata nel seguente modo:

$$F_{R,tot} = 4 * F_R * \mu$$

dove 4 è il numero dei cilindri idealizzati, F_R la forza di reazione che agisce su un singolo pin e μ il coefficiente d'attrito tra la superficie del componente e la superficie dello stampo. In riferimento alla fig. [4.10], in tabella [6.4] sono riportate i valori scelti delle grandezze necessarie a stimare la forza d'estrazione.

I valori del modulo elastico e del coefficiente di Poisson, sia per lo stampo che per il componente, sono stati ricavati dal database di Moldflow.

Parametri per la stima della forza di estrazione	
Geometria pin	
Lunghezza	1,5 mm
Raggio (r_c)	0,4 mm
Dimensioni cilindro idealizzato	
Raggio interno	0,4 mm
Raggio esterno	0,7 mm
Stampo	
Modulo elastico (E_c)	210000 MPa
Coefficiente di Poisson (v_c)	0,33
Componente	
Modulo elastico (E_g)	3200 MPa
Coefficiente di Poisson (v_g)	0,353
Valori simulazione	
Ritiro raggio interno	1,27 %
Ritiro raggio esterno	2,4 %

Tabella 6.4 Parametri per la stima della forze di estrazione (Total PS 1541)

I valori scelti del ritiro volumetrico sono quelli massimi in modo da avere una sovrastima della forza per determinare l'intervallo completo di valori da misurare. I valori del cilindro idealizzato dopo il ritiro volumetrico sono dunque:

- Raggio interno (r_{ig}) = 0,395 mm
- Raggio esterno (r_{og}) = 0,683 mm

Il raggio finale risulta dunque:

$$r_f = r_c + \frac{E_g(v_c - 1)\left(r_c - r_{ig}\right)}{E_c\left(\frac{r_{og}^2 + r_c^2}{r_{og}^2 - r_c^2} + v_g\right) - E_g(v_c - 1)} = 0{,}399978\ mm$$

Da questo valore si possono ricavare le deformazioni radiali dello stampo e del cilindro:

$$\delta_{rc} = r_c - r_f = 2{,}1553 * 10^{-5}\ mm$$

$$\delta_{rg} = r_f - r_{ig} = 5{,}05580 * 10^{-3}\ mm$$

Con questi valori si può ora stimare la pressione agente sulla superficie:

$$p = \frac{\delta_{rc} E_c}{r_f (1 - v_c)} = 16{,}9\ MPa$$

Dunque la forza di reazione agente su un singolo pin è:

$$F_R = p\left(2\pi r_f L\right) = 63{,}7\ N$$

mentre quella totale considerando i quattro pin è:

$$F_{R,tot} = 4 * F_R = 254{,}7\ N$$

avendo considerato $\mu = 0{,}2$, valore sovrastimato. In letteratura infatti sono disponibili alcuni valori del coefficiente d'attrito acciaio/plastica ma non per il PS. I valori massimi trovati sono circa pari a $\mu = 1{,}8$.

La forza d'attrito stimata è in conclusione:

$$F_E = \mu * F_{R,tot} = 50{,}9\ N$$

6.2.4 Lavorabilità dell'inserto alle macchine utensili

Per definire la posizione dei pin è stata considerata anche la fattibilità realizzativa tramite processo di micro fresatura. Sono stati considerati dunque sia la dimensione minima lavorabile ai fini dell'integrità strutturale durante il processo sia gli utensili a disposizione. La lavorazione degli inserti è stata svolta al Politecnico di Milano con il quale il Laboratorio TE.SI. collabora.

Gli utensili disponibili sono riportati in tabella [6.5].

Utensili disponibili per la sgrossatura		
Punta	**Diametro**	**Lunghezza lavorabile**
Sgrossatura	1 mm	1,5 mm
2P211-0050-PC 1620	0,5 mm	1,5 mm
2P212-0060-PC 1620	0,6 mm	3 mm
Alesatore	1 mm	
Foratura	> 1 mm	

Tabella 6.5 Utensili disponibili per la sgrossatura

La punta per forare serve a favorire l'ingresso della fresa da sgrossatura. Il diametro dell'alesatore è stato scelto per garantire la tolleranza di accoppiamento tra l'inserto e l'estrattore. L'utilizzo di queste frese richiede che i pin della cavità siano distanziati dal diametro esterno di 1,1 mm in modo da rimuovere il materiale più esterno con la fresa da 1 mm e lasciando un sovrametallo al pin per la lavorazione di finitura. In definitiva gli inserti sono stati realizzati in un centro di fresatura di ultra precisione KernEvo con risoluzione assiale, accuratezza e ripetibilità sub-micrometrica. Dato che la cavità non è particolarmente complicata è stato possibile utilizzare una configurazione a 3 assi. La lavorabilità della geometria è stata verificata con un software CAM. Per prima cosa è stata effettuata la sgrossatura e successivamente è stata definita una strategia di taglio elicoidale con appositi parametri di processo per controllare la finitura superficiale. Questa operazione è stata eseguita con un utensile JABRO SECO (fig. [6.13]).

Type	JABRO SECO 905L005-MEGA-T
Material	Tungsten Carbide
Dc - Nominal Diameter	500 µm
Cutters	2
rε1 -Tool Tip Radius	0.5
Helix angle [°]	30°
ε	0.025 µm
l 3	2.5 mm

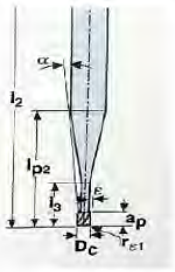

Figura 6.13 Utensile utilizzato per la lavorazione degli inserti

Questo ha un diametro di $502\,\mu m$ e un raggio del tagliente pari a $50\,\mu m$. Terminata la lavorazione del primo inserto è stato controllato l'utensile per verificarne l'usura in modo da stabilire se poterlo utilizzare anche per lavorare gli altri pin senza perdere il controllo della finitura superficiale. Per differenziare la finitura superficiale dei pin delle due cavità sono stati utilizzati differenti parametri di processo. In fig. [6.14] è riportata una fase della generazione del percorso utensile con software CAM.

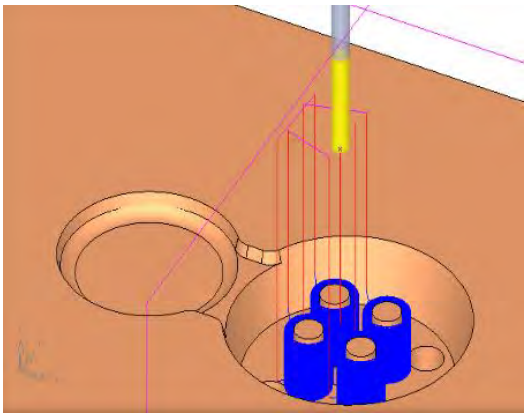

Figura 6.14 Fase della generazione del percorso utensile con un software CAM

In tabella [6.6] sono riportati invece i valori di rugosità superficiale dei due inserti e i relativi parametri di processo utilizzati. Per entrambi gli inserti è stata adottata una fresatura discorde.

Parametri utilizzati nel processo di microfresatura	
Inserto A	
Profondità di taglio assiale (DOC)	15 μm
Avanzamento per dente	15 μm/dente
Inserto B	
Profondità di taglio assiale (DOC)	5 μm
Avanzamento per dente	5 μm/dente
Velocità di rotazione per A e B	78,5 m/min (50000 rpm)
Profondità di taglio radiale per A e B	0,3 mm

Tabella 6.6 Parametri di processo utilizzati per la realizzazione degli inserti

In fig. [6.15] è mostrato uno degli inserti lavorati.

Figura 6.15 Inserto in AISI 420

La finitura superficiale è influenzata sensibilmente da questi parametri. Durante la lavorazione sono attese per l'inserto A forze di taglio maggiori. Di conseguenza saranno maggiori le deformazioni statiche dei pin e dell'utensile. Anche le vibrazioni e l'usura dell'utensile (fig. [6.16]) saranno dunque maggiori causando rugosità superficiali diverse.

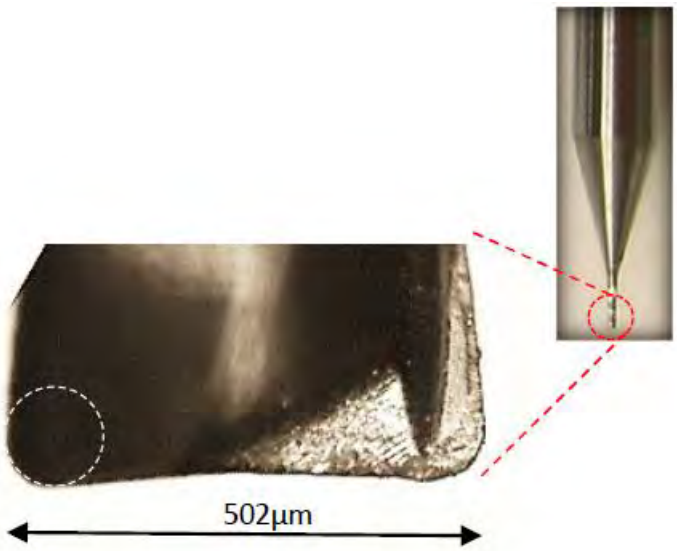

Figura 6.16 Usura dell'utensile dopo la lavorazione dei due inserti

6.2.5 Dimensioni finali della cavità dell'inserto

Le dimensioni finali della cavità così ottenute sono riportate in tabella [6.7].

Dimensioni principali della cavità	
Acciaio	AISI 420 (UNI X20Cr13)
Durezza	18 HRC
Dimensioni della cavità	
Diametro del fondo della cavità	5.82 mm
Diametro della superficie della cavità	6.8 mm
Altezza cavità	1.5 mm
Volume cavità	53.41 mm^3
Numero di pin	4
Dimensioni dei pin	
Altezza dei pin	1.5 mm
Diametro dei pin	0.8 mm
Aspect ratio	1.875
Distanza dei pin dal centro	1.12 mm

Tabella 6.7 Dimensioni principali della cavità degli inserti

Il disegno tecnico dell'inserto realizzato è rappresentato in fig. [6.17].

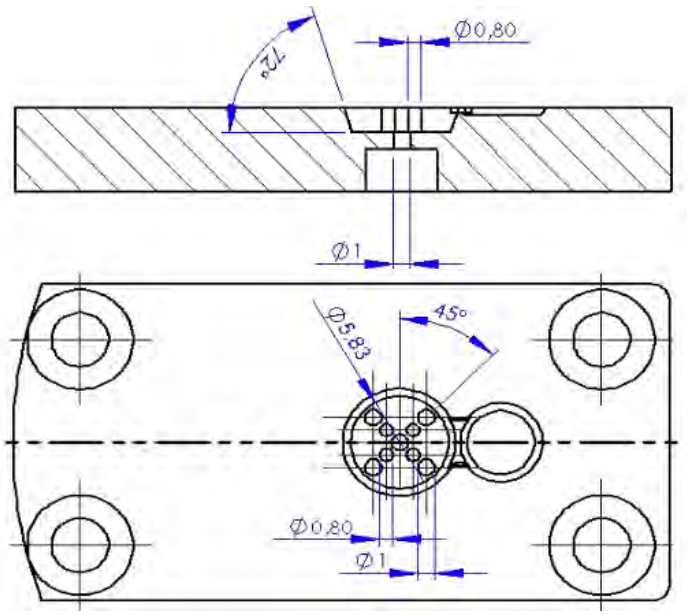

Figura 6.17 Disegno tecnico della cavità

6.2.6 Caratterizzazione delle superfici degli inserti

La caratterizzazione della rugosità di un micro componente è problematica a causa delle sue dimensioni e dei livelli di rugosità molto bassi che limitano l'utilizzo degli strumenti utilizzabili. In questo caso la rugosità non poteva essere misurata tramite tastatori per la ridotta accessibilità della cavità. Per lo stesso motivo non stati utilizzati anche altri strumenti di misura come il microscopio confocale o il profilometro (SEM). Infatti la cavità impedisce rispettivamente ai fasci di luce o di elettroni di colpire ortogonalmente la superficie dei pin. Per ovviare a questo problema è stata utilizzata una tecnica di misurazione indiretta basata sulla replicazione della topografia superficiale. E' stata impiegata una gomma siliconica (RepliSet Struers ®) a rapida reticolazione per ottenere una replicazione molto accurata. La superficie replicata è stata poi misurata con un microscopio a variazione focale (Alicona Infinite Focus ®) adatto per aree con strutture 3D. La misura si è svolta nel seguente modo.

Dopo aver pulito la cavità è stata riempita con la gomma siliconica (fig. [6.18]).

Figura 6.18 Riempimento della cavità con gomma siliconica

Dopo la solidificazione della gomma la replica viene estratta (fig. [6.19]) e preparata per la misurazione.

Figura 6.19 Replica della cavità

E' necessario infatti tagliare la replica per poter misurare la superficie interna di tutti i fori (la replica è il negativo della cavità) (fig. [6.20]).

Figura 6.20 Superficie interna dei fori della replica per la misura della rugosità

La risoluzione garantita con questa tecnica è dell'ordine delle decine di micrometri. Questo la rende adatta a misurare la rugosità delle superfici ottenute per micro fresatura, che generalmente si aggira nell'ordine delle centinaia di nanometri. Per verificare l'accuratezza di questa tecnica di misurazione è stata fatta una misura preliminare della superficie piana superiore dell'inserto ($R_a \approx 300\ nm$) osservando una variazione del 7%, valore accettabile per lo scopo di questo lavoro (fig. [6.21]).

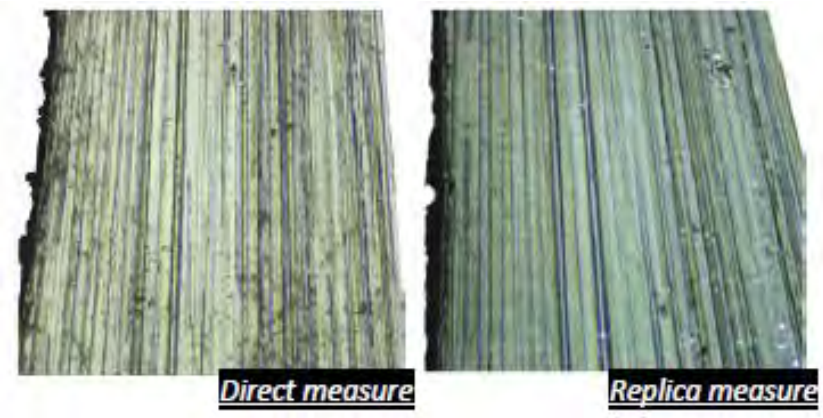

Figura 6.21 Confronto tra tecniche dirette ed indirette di misura delle superfici

Per ridurre l'errore di misura dovuto alla curvatura della superficie dei fori (piccolo angolo di incidenza della luce) è stata misurata al microscopio un'area di piccole dimensioni: $200\ nm * 700\ nm$ (fig. [6.22]).

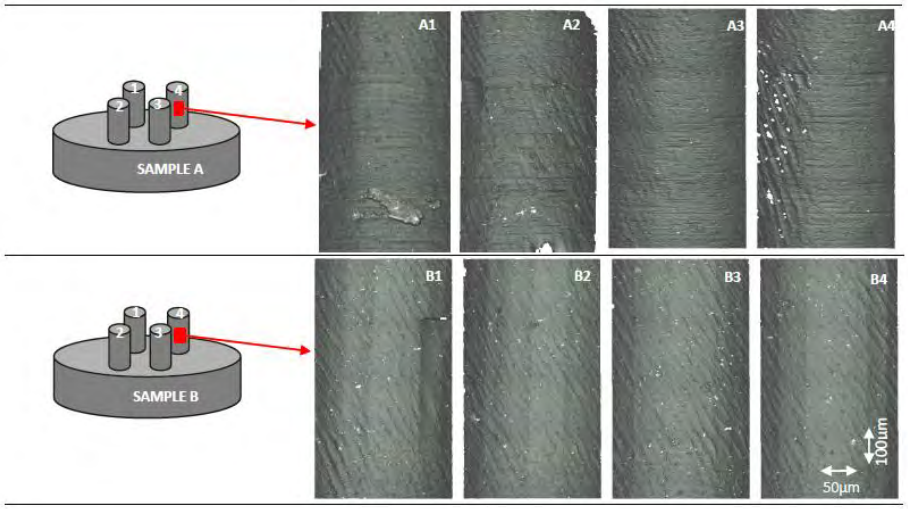

Figura 6.22 Misura 3D della superficie dei pin mediante tecnica di replicazione

I valori di rugosità misurata sono riportati in tab. [6.8].

Rugosità degli inserti	
Inserto A	$S_a = 269\ nm$
Inserto B	$S_a = 233\ nm$

Tabella 6.8 Rugosità degli inserti

6.3 Estrattore

L'estrattore ha lo scopo di rimuovere il componente dallo stampo senza danneggiarne le funzionalità. Per questo esperimento si è utilizzato un estrattore a testa conica di dimensioni $L = 100\ mm$ e $D = 6\ mm$. Questo estrattore si adattava perfettamente al carrello estrattori senza così dover effettuare altre lavorazioni. Inoltre le dimensioni dell'estrattore hanno permesso di adattarlo alla geometria del componente mediante micro fresatura in modo da soddisfare le specifiche progettuali. I fori della cavità corrispondo ai pin dell'estrattore (fig. [6.23]). La distribuzione dei pin e il loro numero sono fondamentali per poter analizzare in modo corretto l'influenza della finitura superficiale. Infatti, perché i risultati siano attendibili, è necessario che le forze d'estrazione siano distribuite il più uniformemente possibile sulle superfici dei pin della cavità. Per determinare il numero di pin di cui l'estrattore deve essere

dotato e la loro posizione ottimale sono state fatte delle simulazioni con il software agli elementi finiti ANSYS ®.

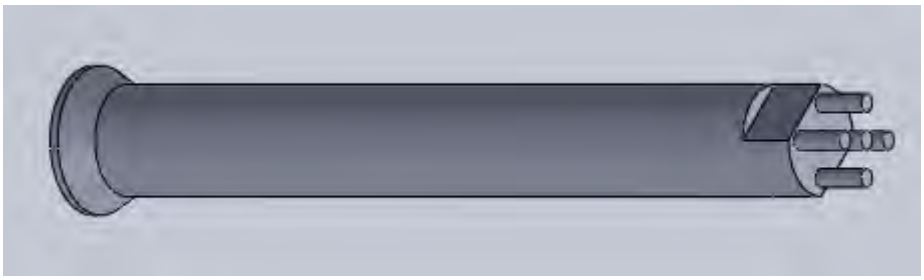

Figura 6.23 Modello CAD dell'estrattore [6.23]

6.3.1 Simulazioni ANSYS

Sulla base del valore stimato tramite le simulazioni numeriche svolte con Moldflow sono state fatte delle simulazioni in ANSYS per confrontare le distribuzioni delle tensioni sulle superfici dei pin con due configurazioni differenti. La forza utilizzata è pari a 30 N in considerazione del fatto che questa era stata precedentemente sovrastimata. Per simulare il comportamento del componente durante la fase d'estrazione l'analisi è stata impostata nel seguente modo:

1. *Simulazione statica*: il tempo di applicazione della forza è quasi istantaneo. Inoltre l'andamento della forza da letteratura è prevalentemente lineare fino al raggiungimento del valore massimo. Questo è il valore di interesse in quanto corrisponde al momento in cui le forze di attrito statico vengono vinte e il pezzo comincia a muoversi;

2. *Mesh*: la mesh utilizzata ha dimensioni uniformi in tutto il componente. La dimensioni degli elementi utilizzati è 0,12 mm.

3. *Spostamenti*: le superfici dei fori del componente sono state vincolate imponendo spostamenti pari a 0 mm in tutte le direzioni (fig. [6.24]). Questo perché fino al raggiungimento del valore massimo di forza il pezzo non si muove. Inoltre non sono state vincolate le superfici esterne

in quanto l'angolo di sformo è elevato e il ritiro produce uno staccamento del componente dalle pareti dello stampo;

Figura 6.24 Vincoli sugli spostamenti nella simulazione in Ansys

4. *Forze*: la forza di 30 N è stata applicata sulle superfici di contatto tra il componente e i pin dell'estrattore (fig. [6.25]). Per poter selezionare in ANSYS le superfici dove applicare le forze d'estrazione il componente è stato modificato in SolidWorks prima di essere importato. E' stato necessario disegnare sul componente le superfici corrispondenti alle aree su cui agiscono i pin dell'estrattore per renderle successivamente parte dell'oggetto mediante la funzione "Linea di divisione". La direzione della forza è ovviamente rivolta sulla superficie del componente.

Figura 6.25 Applicazione delle forze d'estrazione nella simulazione in Ansys

Nella configurazione dell'estrattore a 4 pin si è determinata la distribuzione di tensioni in fig. [6.26].

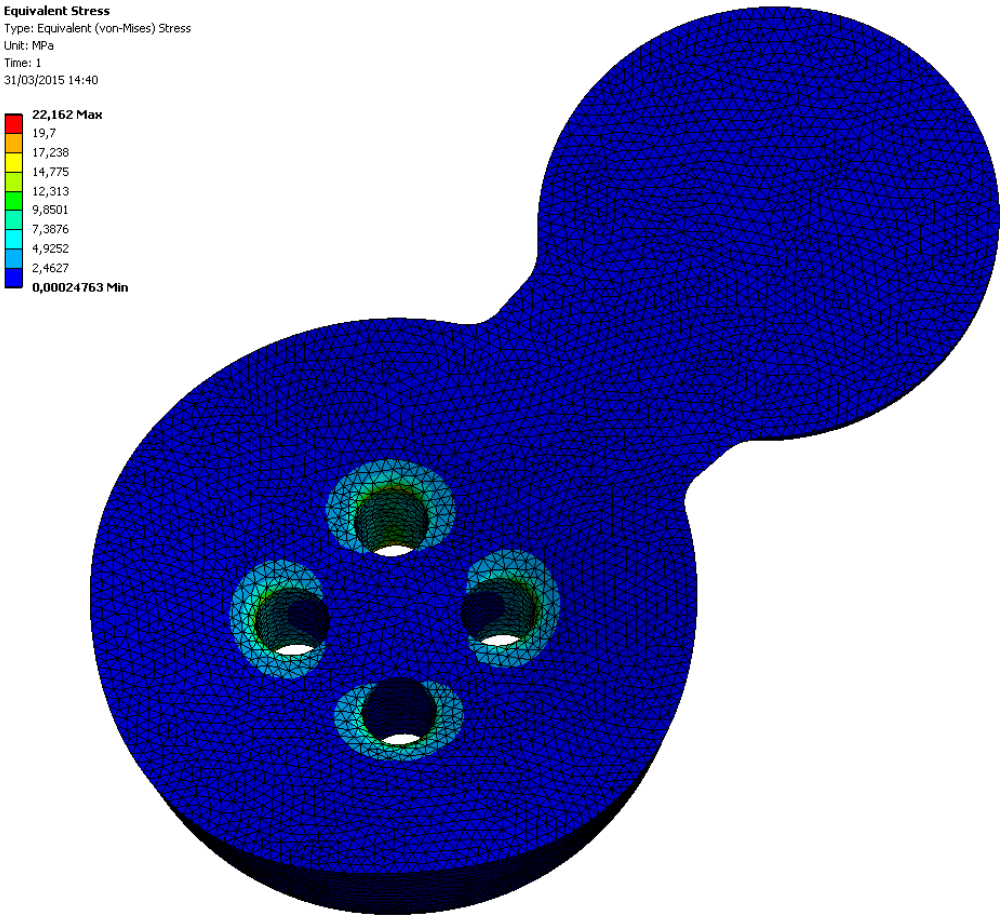

Figura 6.26 Distribuzione delle tensioni nel caso di estrattore con 4 pin

In questo caso si è osservato che la superficie dei fori rivolta verso il centro del componente non è sollecitata da alcuna tensione. Questo significa che durante la fase di estrazione il componente tende ad impuntarsi causando un distacco dai pin della cavità. Questo fenomeno altera l'analisi della finitura superficiale sulle forze d'estrazione che richiede una distribuzione omogenea della forza sulle superfici dei pin. Il valore di tensione massimo é 22,2 MPa. Nel caso di estrattore con 5 pin la distribuzione delle tensioni è quella mostrata in fig. [6.27].

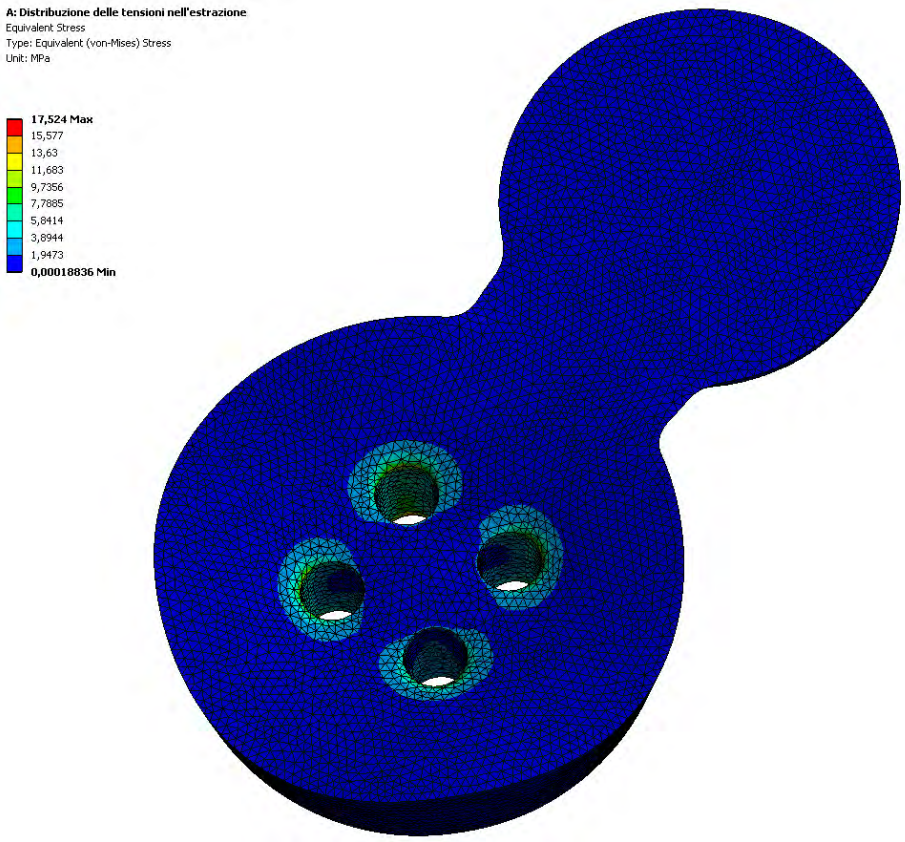

Figura 6.27 Distribuzione delle tensioni nel caso di estrattore con 5 pin

In questo caso invece si è osservato che la superficie dei fori rivolta verso il centro è sollecitata da tensioni, anche se in maniera non completamente uniforme. Il valore di tensione massimo in questo caso è 17,5 MPa, mentre la maggior parte della superficie è interessata da tensioni che vanno dai 5,8 MPa ai 9,7 MPa. Il valore medio è 19,7 MPa. Si osserva dunque una riduzione di tensione del valore massimo di 4,7 MPa, pari circa al 21 %. Il valore medio di tensione può ritenersi variato dello stesso valore anche se la superficie sollecitata è in questo caso aumentata. E' apparso dunque evidente che la presenza di 5 pin assolve meglio le esigenze di analisi dell'influenza della finitura superficiale evitando che il pezzo si impunti.

6.3.2 Lavorabilità dell'estrattore alle macchine utensili

In questo caso non bisogna solamente fare attenzione alla distanza tra i pin ma anche alla loro altezza. Questi sono alti 3 mm. Non è dunque possibile utilizzare

la fresa da 0,5. Per lavorare i pin dell'estrattore è dunque necessario l'utilizzo della fresa con diametro maggiore. Per poter utilizzare questa fresa è necessario però che la distanza dei pin sia almeno pari a 1 mm. Le dimensioni utilizzate nelle simulazioni hanno permesso questa lavorazione senza dover rinunciare ad alcuni vincoli principali come il numero di pin o la loro distribuzione simmetrica rispetto alla cavità.

6.3.3 Dimensioni finali dell'estrattore

In tabella [6.9] sono riportate le dimensioni principali dell'estrattore stabilite.

Caratteristiche estrattore	
Acciaio	AISI 02 (UNI 90MnVCr8 DIN)
Durezza	50 HRC
Trattamento termico	WS
Altezza totale	50.5 mm
Diametro del corpo	6 mm
Dimensioni della base	
Diametro della base	8 mm
Altezza della base	0.5 mm
Angolo dello svaso	60°
Numero dei pin	5
Dimensioni dei pin	
Altezza dei pin	3 mm
Diametro dei pin	1 mm
Aspect ratio	3
Distanza dei pin dal centro (misurata dal centro dei pin)	1.115 mm
Profondità delle guide	3 mm
Distanza delle guide dal centro (misurata ortogonalmente alla guida)	2.13 mm

Tabella 6.9 Caratteristiche principali dell' estrattore

L'altezza delle spalle sui fianchi dell'estrattore, che hanno funzione di guida per evitare la torsione dei pin e garantire dunque la loro integrità strutturale, hanno altezza sufficiente per permettere all'estrattore di compiere la corsa intera senza urtare contro l'inserto.

L'estrattore lavorato è riportato in fig. [6.28].

Figura 6.28 Estrattore in AISI 02

In fig. [6.29] è mostrato invece un particolare dell'accoppiamento tra l'inserto e l'estrattore.

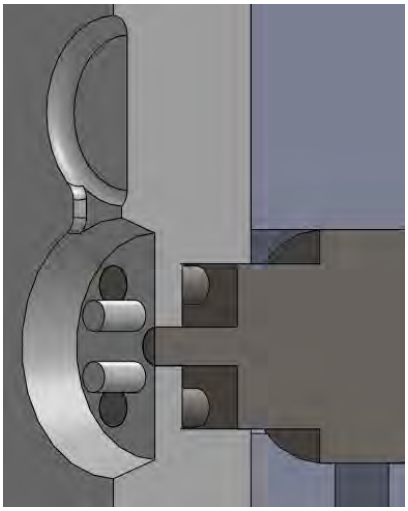

Figura 6.29 Particolare dell'assieme: accoppiamento inserto-estrattore

7 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dei valori di forza è stata effettuata mediante un sensore piezoelettrico. Questo sensore è infatti adatto per misurare in maniera accurata forze di natura dinamica. Il principio di funzionamento di questi sensori si basa sulla proprietà di alcuni materiali di generare una differenza di potenziale proporzionale alla forza a cui sono sottoposti. Questa proprietà è detta *piezoelettricità* ed appartiene ai materiali con struttura cristallina. Tra questi il più utilizzato è il quarzo per via della sua stabilità e sensibilità. In questo lavoro è stato utilizzato un sensore Kistler 9223A (fig. [7.1]).

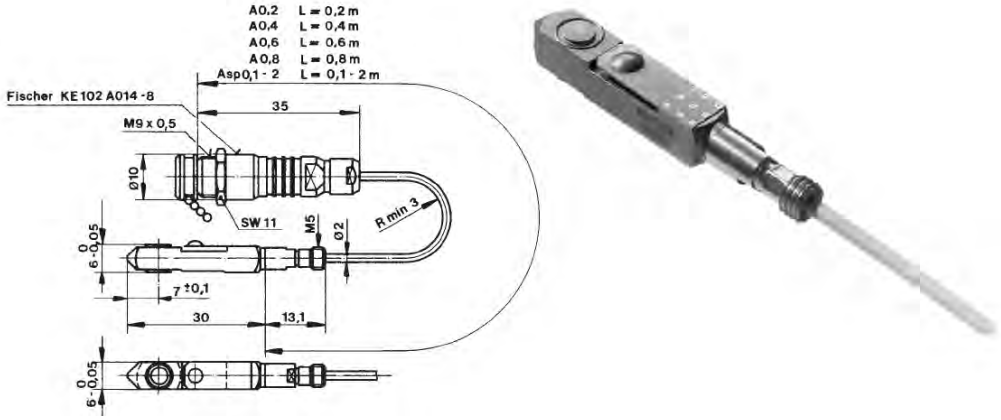

Figura 7.1 Sensore piezoelettrico Kistler 9223A

La scheda tecnica di questo sensore è riportata in fig. [7.2].

Range		N	0 ... 2500
Calibrated partial range		N	0 ... 250
Overload		N	0/3000
Threshold		N	0,01
Sensitivity		pC/N	–4,5
Linearity, also for partial ranges		% FSO	≤±1
Hysteresis		% FSO	≤1
Rigidity, mean value		N/µm	≈460
Natural frequency		kHz	≈200
Operating temperature range		°C	–40 ... 150
Temperature coefficient of sensitivity		%/°C	–0,02
Temperature error		N/°C	<±0,9
Capacitance (with cable Type 1645C0,4)		pF	13
Insulation resistance	at 20 °C	TΩ	≥10
	at 120 °C	TΩ	≥1
Weight (without cable)		g	7

Figura 7.2 Scheda tecnica del Sensore piezoelettrico Kistler 9223A

Il sensore è stato montato dietro la piastra mobile direttamente sul meccanismo a ginocchiera che mette in movimento il carrello estrattori (fig. [7.3]).

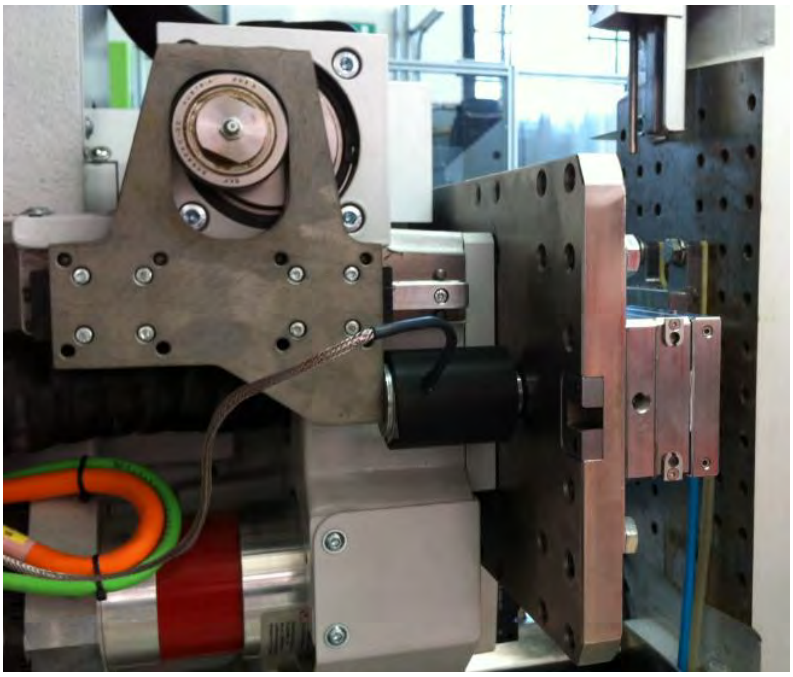

Figura 7.3 Sistema di misura della forza d'estrazione

Come si vede in fig. [7.4] per poter alloggiare il sensore di forza dietro la piastra rotante, unica soluzione possibile per via degli ingombri dello stampo, è stato necessario realizzare una camicia in grado di mantenerlo in posizione. Questa è stata realizzata in ABS mediante una tecnologia di rapid prototyping (stampante 3D). I modelli CAD di questa installazione sono riportati in fig. [7.4].

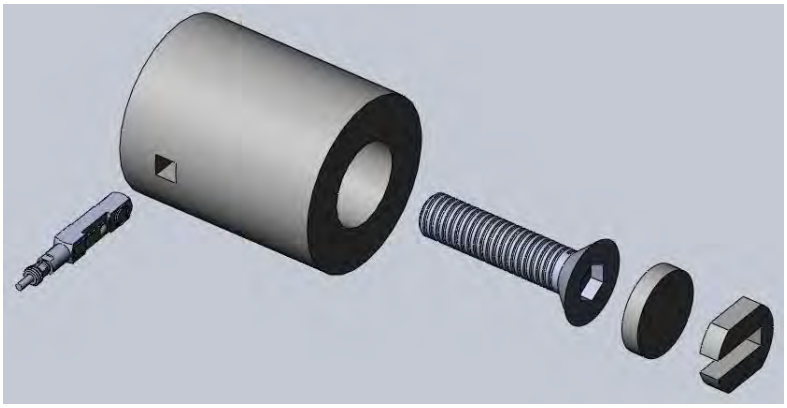

Figura 7.4 Modello CAD del sistema di misura della forza d'estrazione

La camicia ha uno svaso sul fondo per tenere in posizione la vite a testa conica. Sulla testa della vite è stato poi appoggiato un supporto piano per il sensore piezoelettrico, il quale è mantenuto in posizione da un elemento con una apposita sede. Sopra il sensore è stato posto un cilindro di acciaio per permettere il trasferimento del moto della camma al piattello estrattori. In questo modo il sensore rileva la forza necessaria ad estrarre il pezzo dallo stampo.

Dato che per l'elaborazione dei dati è stato necessario effettuare degli offset, ovvero delle misure di forza a secco, è stato montato un interruttore sulla pressa in modo tale che l'acquisizione dei dati possa cominciare nel medesimo istante (fig. [7.5]).

Figura 7.5 Interruttore per l'acquisizione dei dati

L'interruttore è stato montato quando la parte mobile si trovava nel punto morto inferiore, ovvero a stampo aperto.

L'acquisizione dei dati è stata gestita tramite il software LabView ®. In fig. [7.6] è riportata la schermata di acquisizione dove è possibile impostare la sensitività del sensore piezoelettrico, la frequenza di acquisizione e il tempo di salvataggio.

Figura 7.6 Schermata di acquisizione dati del software LabView®

Parte III

Analisi sperimentale

8 Prove sperimentali

In questo lavoro di tesi è stata eseguita una campagna prove preliminare per analizzare l'influenza della finitura superficiale sulle forze d'estrazione in relazione ai parametri di processo. La campagna prove è stata impostata tramite Design of Experiment. La scelta dei fattori è stata fatta sulla conoscenza del fenomeno fisico esaurientemente descritto in letteratura. Dato che l'acquisizione dei dati avviene in maniera diretta, senza richiedere ulteriore tempo a quello necessario al completamento di un ciclo di stampaggio, è stato deciso di eseguire un piano fattoriale completo con 5 fattori e 5 replicazioni per ogni combinazione. Il numero totale di acquisizioni è stato dunque $2^5 \times 5 = 160$. I fattori utilizzati sono stati i seguenti:

1. Finitura superficiale dell'inserto espressa come S_a;
2. Temperatura d'iniezione;
3. Velocità d'iniezione;
4. Pressione di mantenimento;
5. Tempo di raffreddamento.

La scelta dei livelli di questi fattori ha rappresentato una criticità. Infatti uno degli inserti presentava dimensioni maggiori di quelle stabilite per l'accoppiamento inserto/estrattore. Questo inconveniente ha costretto a considerare valori bassi di velocità d'iniezione e pressione di mantenimento per evitare che la plastica trafilasse nella guida dell' estrattore situata sul lato posteriore dell'inserto. In aggiunta a questo un pin dell'estrattore presentava una parete spianata riducendo così ulteriormente i livelli possibili da utilizzare. Per poter misurare delle variazioni di forza al variare dei livelli dei fattori è stato necessario però stabilire livelli non troppo vicini. Questo ha rappresentato una difficoltà ulteriore

dato che valori troppo bassi non consentono un completo riempimento della cavità. In definitiva i valori dei livelli scelti per questo piano fattoriale sono riportati in tab. [8.1].

	Fattori									
	S_a [nm]		T_m [°C]		V_i [mm/s]		P_h [bar]		t_c [s]	
	(-1)	(+1)	(-1)	(+1)	(-1)	(+1)	(-1)	(+1)	(-1)	(+1)
Livelli	233	269	220	220	50	100	40	80	5	10

Tabella 8.1 Livelli dei fattori utilizzati nelle prove sperimentali (DoE)

Ad ogni fattore è stata attribuita una lettera di identificazione. Se questa è espressa in maiuscolo il livello è alto. Le lettere di identificazione sono:

1. A e B rispettivamente per $S_a = 269\ nm$ e $S_a = 233\ nm$
2. m/M per la temperatura d'iniezione;
3. v/V per la velocità d'iniezione;
4. p/P per la pressione di mantenimento;
5. t/T per il tempo di raffreddamento.

L'andamento della forza d'estrazione misurata è riportato in fig. [8.1].

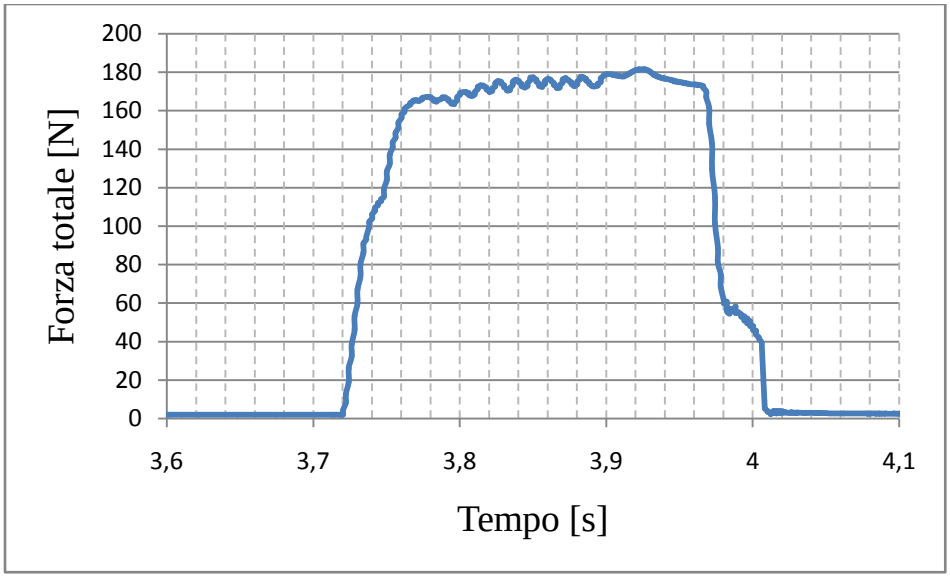

Figura 8.1 Andamento della forza d'estrazione

Dato che l'andamento della forza d'estrazione è il medesimo per tutte le prove, è stato deciso di confrontare il valore massimo. Questo è infatti indicativo della resistenza complessiva del pezzo all'estrazione indipendentemente da quando il pezzo inizia a muoversi. Inoltre l'andamento della curva è dipendente dalla velocità d'estrazione.

8.1 Risultati sperimentali

Sulla base di quanto detto in tabella [8.2] sono riportati i valori di forza d'estrazione massima acquisiti. I valori sono espressi in N.

Risultati sperimentali					
Codice	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
A_MPVt	164,4	168,2	167,8	168,5	168,3
A_MPVT	167,2	167,5	167,1	169,8	168,2
A_MpVT	160,8	160,5	161	160,2	160,7
A_MpvT	161,4	160,7	161,3	162,7	160,8
A_MPvt	162	164,2	164,3	165,6	164
A_MpVt	162,1	162,3	162,1	162,1	162,1
A_MPvT	164,5	163,2	163,6	163,3	165,6
A_Mpvt	162,1	162,2	162,8	163,7	166,8
A_mpvt	161,3	161,2	161,4	159,3	160,5
A_mPvt	162,8	164	165,8	165,2	164,6
A_mPvT	165,1	164,8	164,8	164,9	164,3
A_mPVT	169,6	167,3	165,9	167,4	170,1
A_mPVt	168,7	173	168,7	169,2	169,2
A_mpVT	161,8	160,7	159,1	159,5	159,6
A_mpVt	159,9	160,6	160,4	160,9	160,6
A_mpvT	161,1	161,2	160,1	159,2	159,3
B_MPVt	187,9	174,8	174,2	175,6	175,7
B_MPVT	174,9	174,7	181,5	174,4	173,7
B_MPvt	171,7	170,8	171,3	171	171,4
B_MpVt	166,8	165,2	165,5	173,8	166,7
B_MPvT	168,1	167,8	169,6	169,9	170,4

Continua alla pagina seguente

Continua dalla pagina precedente

B_MpvT	166	164,1	165,3	165,6	164,1
B_MpVT	161,6	161,8	162,2	163,8	164,4
B_Mpvt	160,6	165	164	163,6	164,3
B_mpVT	160	157,7	157,1	158,8	158,7
B_mpVt	157,6	158,4	162,7	156,1	156,4
B_mPVT	159,8	161,8	162	162,6	161,2
B_mPvT	158,8	160	158,2	157,9	156,7
B_mPvt	158,2	153,1	157,1	157	158,5
B_mpvt	154,8	155,3	153	153,1	155,7
B_mpvT	152,4	153,4	154,6	154,3	153,1
B_mPVt	160,1	159,9	160,1	161,1	160,6

Tabella 8.2 Valori di forza d'estrazione misurati

8.2 Elaborazione dei risultati sperimentali

Alcuni valori che acquisiti sono outlier. In ogni caso 4 replicazioni sono sufficienti per una elaborazione statistica dei dati. I valori medi e le deviazioni standard calcolati senza outlier sono mostrati in tab. [8.3].

	Forza totale media [N]	Deviazione standard [N]
A_MPVt	168,2	0,29
A_MPVT	167,5	0,5
A_MpVT	160,6	0,3
A_MpvT	161,1	0,35
A_MPvt	164,	1,29
A_MpVt	162,1	0,09
A_MPvT	164,	1,01
A_Mpvt	162,7	0,73
A_mpvt	160,7	0,88
A_mPvt	164,5	1,15
A_mPvT	164,8	0,29
A_mPVT	168,1	1,75

Continua alla pagina seguente

Continua dalla pagina precedente

A_mPVt	169	0,29
A_mpVT	160,1	1,1
A_mpVt	160,5	0,37
A_mpvT	160,2	0,95
B_MPVt	175,1	0,71
B_MPVT	174,4	0,53
B_MPvt	171,2	0,35
B_MpVt	166,1	0,82
B_MPvT	169,2	1,15
B_MpvT	165,0	0,88
B_MpVT	162,8	1,26
B_Mpvt	164,2	0,59
B_mpVT	158,5	1,11
B_mpVt	157,1	1,07
B_mPVT	161,5	1,06
B_mPvT	158,3	1,21
B_mPvt	157,7	0,76
B_mpvt	154,4	1,26
B_mpvT	153,6	0,9
B_mPVt	160,4	0,49

Tabella 8.3 Forza totale media e deviazione standard dei dati acquisiti

Per ricavare la forza effettiva necessaria ad estrarre il componente dallo stampo sono state eseguite delle prove a secco in modo da poter realizzare un offset. Questo è stato fatto per entrambi gli inserti in virtù del fatto che i fori presentavano dimensioni differenti a causa di problematiche verificatesi durante il processo di micro fresatura. Di conseguenza i fori sono stati successivamente allargati a mano per permettere l'accoppiamento. Per eseguire un ciclo a secco è sufficiente nella schermata principale del computer della pressa selezionare questa possibilità.

I valori ottenuti a secco sono riportati in tab. [8.4]. Anche in questo caso sono state eseguite 5 replicazioni.

Forza a secco			
Inserto A	**Forza a [N]**	**Inserto B**	**Forza [N]**
1	137,2	1	133,2
2	137,9	2	133,9
3	137	3	134,1
4	137,1	4	133,7
5	137,7	5	133,8
	F media [N]		**F media [N]**
	137,4		133,7
	Dev. Stand.		**Dev. Stand.**
	0,4		0,3

Tabella 8.4 Forza e deviazioni standard delle prove a secco

Tra i due inserti vi è dunque una differenza di forza a secco pari a 3,7 N. In fig. [8.2] è riportato l'andamento della forza a secco rispetto a quello ottenuto per la forza totale.

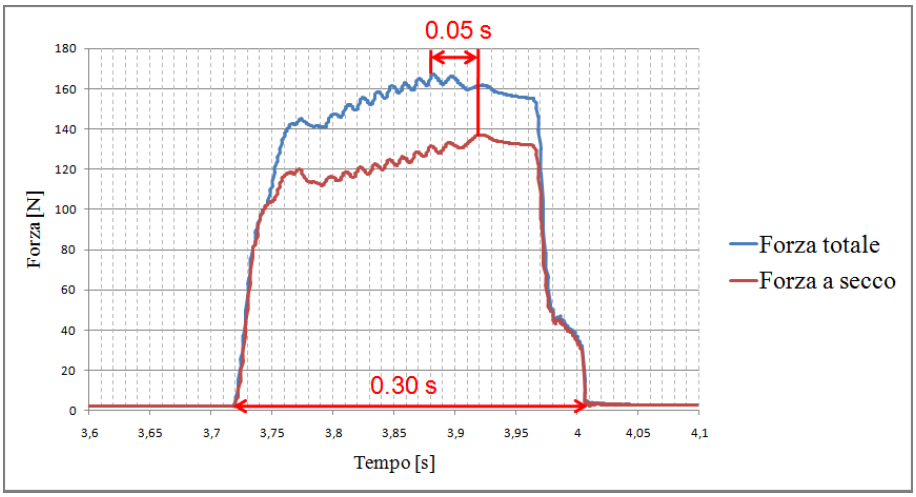

Figura 8.2 Confronto tra forza a secco e forza totale

Dato che l'andamento delle curve è simile è stato deciso di utilizzare come valore di confronto la differenza tra i valori massimi anche se non corrispondono allo stesso istante di tempo. Questo è dovuto alla presenza del componente da estrarre.

I valori di forza d'estrazione netta ottenuti sono riportati in tab. [8.5]

	Forza netta [N]
A_MPVt	30,8
A_MPVT	30,1
A_MpVT	23,2
A_MpvT	23,7
A_MPvt	26,6
A_MpVt	24,7
A_MPvT	26,6
A_Mpvt	25,3
A_mpvt	23,3
A_mPvt	27,1
A_mPvT	27,4
A_mPVT	30,7
A_mPVt	31,6
A_mpVT	22,7
A_mpVt	23,1
A_mpvT	22,8
B_MPVt	41,4
B_MPVT	40,7
B_MPvt	37,5
B_MpVt	32,4
B_MPvT	35,5
B_MpvT	31,3
B_MpVT	29,1

Continua alla pagina seguente

Continua dalla pagina precedente

B_Mpvt	30,5
B_mpVT	24,8
B_mpVt	23,4
B_mPVT	27,8
B_mPvT	24,6
B_mPvt	24,0
B_mpvt	20,7
B_mpvT	19,9
B_mPVt	26,7

Tabella 8.5 Forza netta misurata

8.3 Discussione dei risultati sperimentali

Con questi valori è stata eseguita l'analisi della varianza. Dall'analisi della varianza si sono ricavate informazioni riguardanti gli effetti principali e le interazioni tra i fattori. I risultati ottenuti sono riportati graficamente in fig. [8.3] e fig. [8.4].

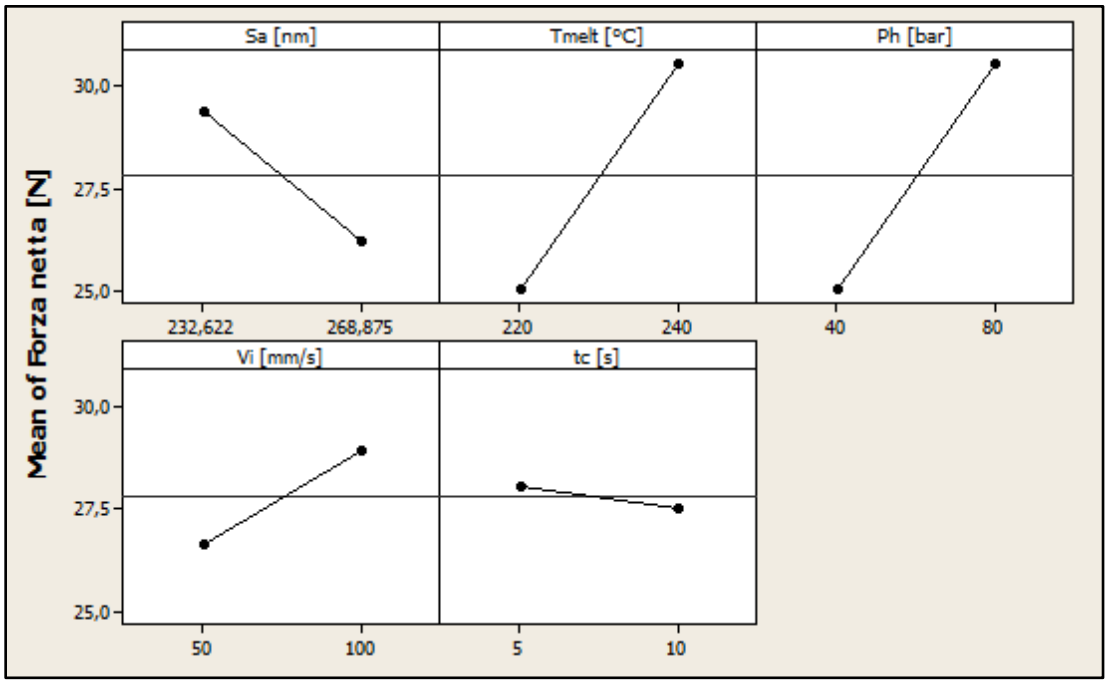

Figura 8.3 Effetti principali

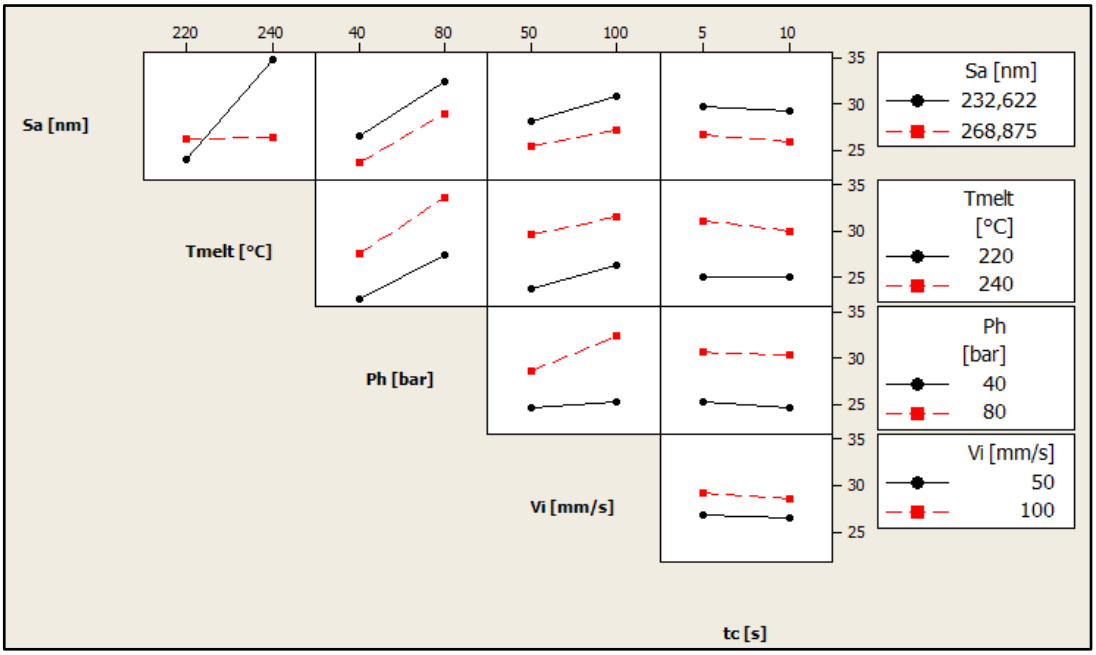

Figura 8.4 Interazioni tra i fattori

In tab. [8.6] sono riportati i valori ottenuti del test statistico p. Solo tramite un test statistico è infatti possibile determinare la significatività di un fattore o la presenza di interazioni.

ANOVA dati sperimentali		
Effetti principali	P-value	Significatività (0,05)
S_a	0,000	Si
T_m	0,000	Si
V_i	0,001	Si
P_h	0,000	Si
t_c	0,363	No
Interazioni		
S_a/ T_m	0,000	Si
S_a/ P_h	0,654	No
S_a/ V_i	0,363	No
S_a/ t_c	0,787	No

Continua alla pagina seguente

Continua dalla pagina precedente

T_m / P_h	0,279	No
T_m / V_i	0,531	No
T_m / t_c	0,279	No
P_h / V_i	0,013	Si
P_h / t_c	0,686	No
V_i / t_c	0,840	No

Tabella 8.6 P-value degli effetti principali e delle interazioni

Il livello di significatività utilizzato è 5%, ovvero $p = 0{,}05$. Si può osservare come la forza d'estrazione sia influenzata sia dalla rugosità superficiale, che determina il coefficiente d'attrito, sia dai parametri di processo, che determinano il ritiro volumetrico. L'unico fattore a non influenzare il valore della forza d'estrazione è il tempo di raffreddamento. Questo risultato non può essere ritenuto valido in generale in quanto è fortemente legato al tipo di materiale utilizzato, ovvero alle sue curve pvt. In ogni caso, dato che i livelli utilizzati di velocità d'iniezione sono bassi (e dunque anche i corrispondenti valori di pressione d'iniezione), è possibile affermare che questo risultato è valido in tutta la finestra di stampaggio consentita dalla macchina in quanto le curve pvt presentano un andamento a basse temperature tanto più piatto quanto più è elevata la pressione d'iniezione. Valori ancora più bassi di tempo di raffreddamento non sono rilevanti in quanto causerebbero distorsioni del pezzo troppo elevate per via del mancato raggiungimento di una temperatura d'estrazione sufficiente. Il tempo di raffreddamento non presenta inoltre alcuna interazione con gli altri fattori. Questo è facilmente intuibile dal fatto che gli altri parametri di processo agiscono in una fase differente del ciclo di stampaggio che con questa non ha nulla a che fare. Dai grafici delle interazioni si può osservare come la rugosità superficiale abbia un'interazione con la temperatura d'iniezione ma non con la pressione di mantenimento e la velocità d'iniezione. In particolare per il livello di rugosità superficiale minore un aumento di temperatura causa un aumento sensibile delle forze d'estrazione, mentre per il livello di rugosità superficiale maggiore la forza d'estrazione resta pressoché

invariata. Alle temperature più basse la forza richiesta per estrarre il componente è maggiore nell'inserto con rugosità maggiore mentre a temperature più alte si ha il contrario. Questo può essere giustificato da una diminuzione della viscosità dovuta all'aumento di temperatura che favorisce la replicazione della topografia superficiale dei pin aumentando così la superficie di contatto. Lo stesso non avviene probabilmente per il livello maggiore di rugosità in quanto i valori di velocità d'iniezione e pressione di mantenimento sono troppo bassi per replicare completamente la superficie dei pin. In questo modo si avrebbe un aumento di superficie di contatto nel caso di rugosità più basse per un fatto di semplicità di replicazione. Inoltre l'effetto principale della rugosità superficiale è quello di far diminuire la forza d'estrazione facendo pensare che i livelli di rugosità scelti si collochino a sinistra del minimo della curva della forza d'estrazione dove la componente di adesione dell'attrito è superiore a quella di replicazione. Questo è in accordo con quanto detto riguardo l'aumento di area di contatto. Se questa aumenta è favorita la componente di adesione. Gli effetti principali della pressione di mantenimento e della velocità d'iniezione sono giustificabili rispettivamente da un aumento della pressione del materiale sulla superficie del componente indipendentemente dal fatto che prevalga l'adesione o la replicazione e da una diminuzione dell'effetto pelle. L'interazione tra questi due fattori infatti è dovuta al fatto che un maggior strato superficiale di materiale solidificato è meno sensibile alla pressione di mantenimento e viceversa. La temperatura d'iniezione non mostra invece alcuna interazione con la pressione di mantenimento e la velocità d'iniezione.

Parte IV

Conclusioni

9 Conclusioni

E' possibile suddividere il lavoro svolto in due fasi distinte:

1. Una prima fase di progettazione nella quale è stato sviluppato un sistema per l'analisi dell'influenza della superficie dello stampo sulle forze di estrazione.

2. Una seconda fase di sperimentazione nella quale il sistema ideato è stato verificato e successivamente utilizzato per eseguire un piano fattoriale completo per analizzare l'interazione tra i parametri di processo e la finitura superficiale dello stampo.

Le prove hanno messo in evidenza che il sistema di acquisizione della forza d'estrazione, costituito da un sensore piezoelettrico opportunamente installato su una Battenfeld MicroPower 15t, è adatto allo scopo in quanto ripetibile durante l'esecuzione delle replicazioni e sufficientemente sensibile a misurare variazioni di forza di qualche N indotte da piccole variazioni dei parametri di processo.

Le prove hanno evidenziato la necessità di tolleranze di accoppiamento albero/foro più restrittive nel caso in cui si voglia analizzare l'intero campo di applicazione della macchina in termini di velocità di iniezione e pressione di mantenimento. In particolare si è deciso di realizzare nuovi inserti con tolleranza di accoppiamento complessiva albero/foro pari a $5\ \mu m$.

Dall'esecuzione del piano fattoriale si sono ottenuti i seguenti risultati:

1. Sono state determinate variazioni significative di forza d'estrazione con inserti aventi finitura superficiale non eccessivamente differenziata ($36\ nm$). Questo primo risultato pone l'attenzione sulla definizione della finitura superficiale per una adeguata qualità del componente. In questo caso la differenza di rugosità ha causato una variazione di forza pari a $5\ N$ per una superficie totale di $15\ mm^2$;

2. Sono state determinate variazioni significative di forza d'estrazione in relazione ai parametri di processo. Quelli significativi sono stati:

    - Temperatura d'iniezione: variazioni di circa $10\ N$ (pari al 40%) per $\Delta T_m = 20\ °C$;

    - Velocità d'iniezione: variazioni di circa $3\ N$ (pari al 11.5 %) nel caso in cui $\Delta V_i = 50\ mm/s$;

    - Pressione di mantenimento: variazioni di circa $10\ N$ (pari al 40%) per $\Delta P_h = 40\ bar$.

3. E' stato determinato che il tempo di raffreddamento non influenza le forze d'estrazione nel caso il componente sia realizzato con PS;

4. E' stata determinata una interazione tra rugosità superficiale e temperatura d'iniezione. I valori misurati indicano che per diminuire la forza d'estrazione non è sufficiente ridurre la rugosità superficiale ma è ma si deve determinare un valore adeguato per evitare che le forze d'adesione aumentino eccessivamente. Quanto determinato è influenzato dai valori utilizzati di velocità d'iniezione e pressione di mantenimento. Oltre alla rugosità superficiale espressa tramite S_a, risulta fondamentale l'andamento del profilo della superficie in quanto questo può notevolmente aumentare la superficie di contatto. La variazione di temperatura ha causato una variazione della forza d'estrazione per l'inserto con rugosità minore pari a $10\ N$ mentre nell'altro caso non si è riscontrata una variazione di forza significativa;

5. E' stata determinata una interazione tra la velocità d'iniezione e la pressione di mantenimento che può essere interpretata come una conseguenza dell'accentuarsi dell'effetto pelle al diminuire della velocità

d'iniezione. Questo evidenzia, in relazione all'effetto della temperatura d'iniezione, la possibilità di analizzare l'influenza della temperatura dello stampo sulle forze d'estrazione.

Il lavoro si è dunque concluso con una prima analisi dell'influenza della rugosità superficiale in relazione ai parametri di processo dopo una iniziale fase di progettazione. I risultati ottenuti hanno individuato i parametri d'influenza e determinato il futuro proseguimento del lavoro. In quest'ottica si suggerisce di proseguire l'analisi aumentando i livelli dei parametri di processo utilizzati sulla base di tolleranze di accoppiamento albero/foro più strette. Anche la rugosità superficiale può essere maggiormente differenziata. Infine l'utilizzo di rivestimenti superficiali può essere esaminato per una analisi più approfondita del carattere adesivo del fenomeno.

Bibliografia

[1] Y. Sun and Y. C. Kwok, *"Polymeric microfluidic system for DNA analysis"*, Anal. Chim. Acta, vol. 556, no. 1, pp. 80-96, 2006.

[2] Z. Guttemberg, H. Muller, H. Habermuller, A. Geisbauer, J. Pipper, J. Felbel, M. Kielpinscki, J. Scriba and A. Wixforth, Lab. Chip 5, 2005.

[3] D.Mair, E. Geiger, A. P. Pisano, J. M. J. Frechet and F. Svec, *"Injection molded microfluidic chips featuring integrated interconnects"*, Lab. Chip 5, vol. 6, no. 10, pp. 1346-1354, 2006.

[4] R. M. McCormick, R. J. Nelson, M. G. Alonso-Amigo, J. Benvegnu and H. H. Hooper, Anal. Chem. 69, p. 2626, 1997.

[5] G. J. Kellogg, T. E. Arnold, B. L. Carvalho, D. C. Duffy and N. F. Sheppard, *"TAS 2000 Symposium on micro total analysis systems"*, Kluwer, Enschede, Netherlands, 2000.

[6] Tim A. Osswald e Juan P. Hernandez-Ortiz, "*Polymer Processing. Modeling and Simulation"*, Hanser, pp. 144-146, 2006.

[7] L. Alting, F. Kimura, H. N. Hansen, G. Bisacco, "*Micro Engineering"*, C I R P Annals, Vol. 52, No. 2, pp. 635-658, 2003.

[8] Y. Qin, *"Overview on micro manufacturing",* Elsevier, Glasgow, p.9, 2009.

[9] M. Annoni, B. M. Colosimo, L. Pagani, L. Rebaioli, Q. Semeraro, "*Geometrical quality improvement of high aspect ratio micromilled pins"*, Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 42, 2014.

[10] G. Tosello e H. N. Hansen, "*Micro Injection Molding"*, Micro Manufacturing Engineering and Technology, 1a, Elsevier, Oxford, UK, pp. 90-111, 2010.

[11] J. Giboz, T. Copponnex e P. Mélé, "*Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review"*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 17, N. 6, 2007.

[12] http://www.wittmann-group.it/images/db/dt_product/120/image_MICRO_gb.pdf.

[13] R. J. Crawford, "*Plastics Engineering"*, Third Edition, Butterworth Heinemann, pp. 48-52, 1998.

[14] A. C. Liou e Ren-Haw Chen, *"Injection molding of polymer micro and sub micron structures with high aspect ratio"*, The international journal of advanced manufacturing technology, 28, 11-12, pp. 1097-1103, 2006.

[15] Attia, Usama M., Silvia Marson e Jeffrey R. Alcock, "*Micro injection moulding of polymer microfluidic devices"*, Microfluidics and Nanofluidics, 7, 1, pp, 1-28, 2009.

[16] R. Surace, V. Bellantone, I. Fassi e G. Trotta, "*The micro injection moulding process for polymeric components manufacturing"*, New Technologies-Trends, Innovations and Research, pp. 65-90, 2012.

[17] Xu, Guojun, Liyong Yu, James L. Lee e Kurt W. Koelling, "*Experimental and numerical studies of injection molding with microfeatures"*, Polymer Engineering and Science, 45, 6, pp. 866-875, 2005.

[18] Yoo, Yeong-Eun, Tae-Hoon Kim, Tae-Jin Je, Doo-Sun Choi, Chang-Wan Kim e Sun-Kyung Kim, "*Injection molding of micro patterned PMMA plate"*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21, pp. 148-152, 2011.

[19] Gronik Christian, "*Injection moulding of parts with microstructured surfaces for medical applications"*, Macromolecular Symposia, 217, 1, pp. 365-374, 2004.

[20] Chen, Chun-Sheng, Shia-Chung Chen, Won-Hsion Liao, Rean-Der Chien e Su-Hsia Lin, "*Micro injection molding of a micro fluidic platform"*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 9, pp. 1290-1294, 2010.

[21] Fu, Gang, Shu Beng Tor, David E. Hardt e N. H. Loh, "*Effects of processing parameters on the micro channels replication in microfluidic devices fabricated by micro injection molding"*, Microsystem Technologies, 17, 12, pp. 1791-1798, 2011.

[22] Lin, Huang-Ya, Ching-Ho Chang e Young Wen-Bin, "*Experimental and analytical study on filling of nano structures in micro injection molding"*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 10, pp. 1477-1486, 2010.

[23] G. Menges, W. Michaeli, P. Mohren, "*How to make Injection Molds"*, Third Edition, Hanser, pp. 401-420, 2000.

[24] Araujo BJ, Pouzada AS, *"Design of ejection systems for injection moulding"*, O Molde, 54, 2002.

[25] Omar M. Bataineh e Barney E Klamecki, *"Prediction of local part-mold and ejection force in injection molding"*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 127, 2005.

[26] Pouzada AS, Ferreira EC and Ponte EJ, *"Friction properties of moulding thermoplastics"*, Polymer testing 25, 2006.

[27] Correia MS, Miranda AS, Oliveira MC, Capela CA, Pouzada AS, *"Analysis of friction in the ejection of thermoplastic mouldings"*, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2012.

[28] AJ Pontes, Ferreira EC, Pouzada AS, *"The effect of temperature and surface roughness on the coefficient of friction between thermoplastic and*

moulding surfaces", paper presented at the PPS Americas Reg. Meeting, Florianopolis, Brasil, 2004.

[29] Goncalves MW, Salmoria GV, Ahrens CH, Pouzada AS, *"Study of tribological properties of moulds obtained by stereo-lithography"*, Virtual Phys Prototyp 2(1):29-36, 2007.

[30] Ferreira EC, Costa MF, Laranjeira CR, Oliveira MJ, Pouzada AS, *"Comparative study, by optical techniques of the interface polymer/steel in replication conditions"*, Mater Sci Forum 455-456:467-471, 2004.

[31] Correia M, Capela C, Pouzada AS, Miranda AS, *"Contributions to the modelling of ejection in injection moulding"*, paper presented at the PMI 2007 International Conference on polymers and moulds innovations, Gent, Belgium, 2007.

[32] C.A. Griffiths, G. Tosello, S.S. Dimov, S.G. Scholz, A. Rees, B. Whiteside, *"Characterisation of demoulding parameters in micro injection moulding"*, Springer, Berlino, 2014.

[33] Sasaki T, Koga N, Shirai K, Kobayashi Y, Toyoshima A, *"An experimental study on ejection forces of injection molding"*, Journal of the international societies for precision engineering and nanotecnology, pp. 270-273, 2000.

[34] Pontes AJ, Pouzada AS, *"Ejection force in tubular injection moldings. Part I. Effect of processing conditions"*, Polym. Eng. Sci. 44:891-897, 2004.

[35] Montgomery DC, *"Controllo statistico della qualità"*, McGraw Hill, 2006.

[36] Tim A. Osswald, *"Understanding polymer processing. Processes and governing equations"*, Hanser, pp.179-187, 2010.