



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Studio dell'applicazione di attuatori elettrici
in sistemi a camera calda per lo stampaggio ad iniezione
di polimeri termoplastici

Study of the application of electric actuators
in hot runner systems for injection molding
of thermoplastic polymers

Relatore:
Prof. Ing. Marco Sasso

Tesi di:
Matteo Pranzetti

Anno accademico 2018/2019

Indice

Abstract	1
1. Introduzione	2
2. Lo stampaggio ad iniezione	6
2.1 La pressa ad iniezione	7
2.2 Gli stampi	10
2.2.1 Sistema di alimentazione del materiale	11
2.2.1.1 Canale di iniezione	13
2.2.1.2 Canali di alimentazione	14
2.2.1.3 Punto di iniezione	15
2.2.2 Sistema di estrazione	18
2.2.2.1 Tipologie di sistemi di estrazione	18
2.2.3 Sistema di raffreddamento	24
2.3 Il processo di stampaggio ad iniezione	27
3. Le camere calde	28
3.1 Cenni storici	30
3.2 Vantaggi e svantaggi dei sistemi a camera calda	31
3.3 Componenti di un sistema a camera calda	33
3.3.1 Manifold	35
3.3.2 Foglio isolante termico	37
3.3.3 Camera di fusione	38
3.3.4 Elementi riscaldanti per le camere calde	38
3.3.5 Ugelli a canale caldo	40
3.3.5.1 Ugelli Aperti	42
3.3.5.2 Ugelli con Valvola	47

4. Sistemi di attuazione dello spillo	50
4.1 Sistema di otturazione automatico	50
4.2 Sistema di otturazione oleodinamico o pneumatico.....	51
4.3 Sistema di otturazione elettrico	53
4.3.1 Elettromagnete.....	54
4.3.1.1 Elettromagnete a solenoide.....	55
4.3.1.2 Voice Coil Actuator.....	56
4.3.1.3 Aspetti negativi.....	57
4.3.2 Motore elettrico	58
4.3.2.1 Principali tipologie e caratteristiche dei motori elettrici	58
4.3.2.2 Motore brushless AC	61
5. Il pistone elettrico.....	63
5.1 Dati	63
5.2 Scelta dell'attuatore elettrico.....	65
5.3 Scelta del meccanismo	66
5.4 Dimensionamento del pistone elettrico	69
6. Risultati delle prove	87
7. Conclusioni	96
Bibliografia	101

Abstract

Le camere calde sono delle apparecchiature che vengono montate negli stampi per lo stampaggio ad iniezione delle materie plastiche.

Permettono di eliminare la materozza e di migliorare notevolmente il processo di stampaggio. Per questo, quando si hanno alti volumi di produzione e oggetti particolarmente complessi, vengono sempre di più applicate agli stampi.

In questa tesi ci si concentrerà maggiormente sulle camere calde con otturatore, ossia una valvola che apre e chiude il punto di iniezione. L'obiettivo è quello di sostituire gli attuatori oleodinamici e pneumatici, tradizionalmente utilizzati per movimentare l'otturatore, con attuatori di tipo elettrico. Quindi si cercherà di analizzare quale sia il miglior attuttore per questo tipo di applicazione. Nel caso dei motori elettrici, quali sono i meccanismi disponibili per convertire il moto da rotatorio a lineare ed infine, dopo aver definito la miglior combinazione di parti, effettuare un dimensionamento di massima che ci permetterà di realizzare un prototipo, il quale verrà utilizzato per verificare le ipotesi effettuate, validare i calcoli e per trovare quelli che potrebbero essere i punti deboli del prodotto al fine di poterlo migliorare.

1. Introduzione

Dal 2009 al 2017 la produzione mondiale dei materiali polimerici è aumentata di 100 milioni di tonnellate, arrivando così a 350 MT di materie plastiche prodotte all'anno, e che sono in continua crescita.

Le ragioni che hanno portato la plastica ad essere il materiale più prodotto al mondo sono innumerevoli e tutte più o meno connesse tra loro.

Sicuramente alla base di tale sviluppo, iniziato a partire dal II° dopo guerra, troviamo la proprietà di questi materiali ad essere facilmente lavorati e modellati, andando così a sostituire fin da subito oggetti che venivano realizzati con materiali naturali.

Intanto nei laboratori la ricerca sui polimeri continuava a 360°, non solo per quanto riguarda il miglioramento delle proprietà di questi materiali, ma anche per quanto concerne la loro produzione.

Ben presto ci si accorse che i materiali polimerici potevano andare a sostituire i materiali naturali, andando di fatto a migliorarne la qualità e riducendone il costo, in quanto questi nuovi materiali potevano essere prodotti su larga scala tramite l'utilizzo di appositi impianti e trasformati con tecniche automatizzate che ne permettono un'elevata produttività.

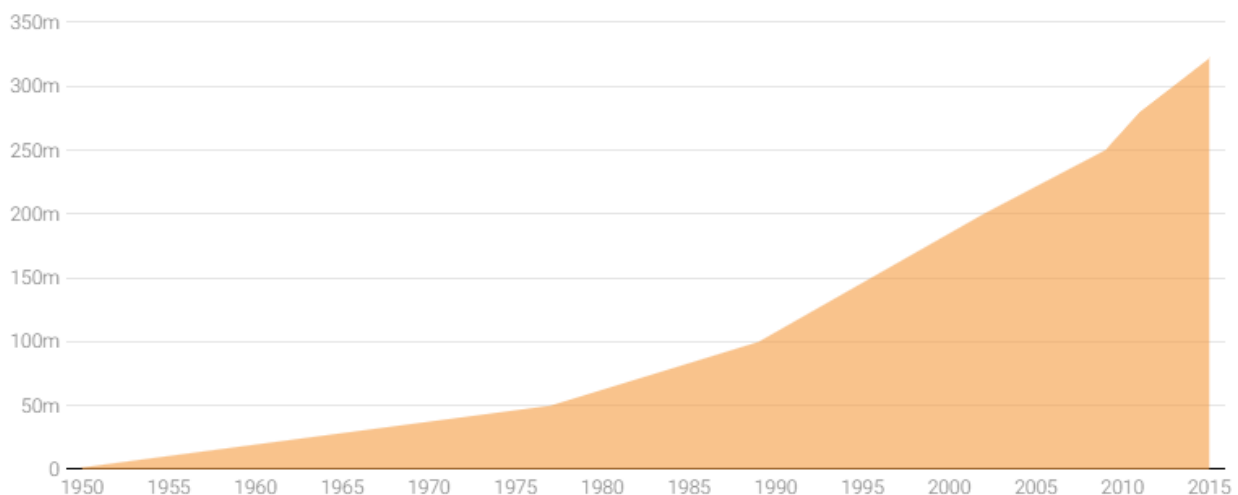


Fig. 1.1: Andamento della produzione mondiale di plastica, dal 1950 al 2015, espresso in megatonnellate.

Queste caratteristiche:

- Buona lavorabilità;
- Bassa densità;
- Bassa conducibilità elettrica e termica;
- Ottima resistenza alla corrosione;
- Buona resistenza meccanica;
- Buona resistenza agli urti;

hanno gettato le basi per un solido sviluppo di questi materiali.

Oggi giorno queste caratteristiche, insieme alla continua ricerca della riduzione dei costi di produzione dei prodotti, dell'impatto ambientale delle produzioni industriali e alla necessità di far fronte ai nuovi modi di consumare della società, hanno portato le materie plastiche ad essere il materiale più prodotto al mondo, in quanto vengono sempre di più utilizzate per sostituire oggetti che vengono realizzati in metallo o in vetro, soprattutto nei settori dell'automotive e del packaging, dove oltre alla necessità di avere prodotti di alta qualità, si hanno enormi volumi di produzione.

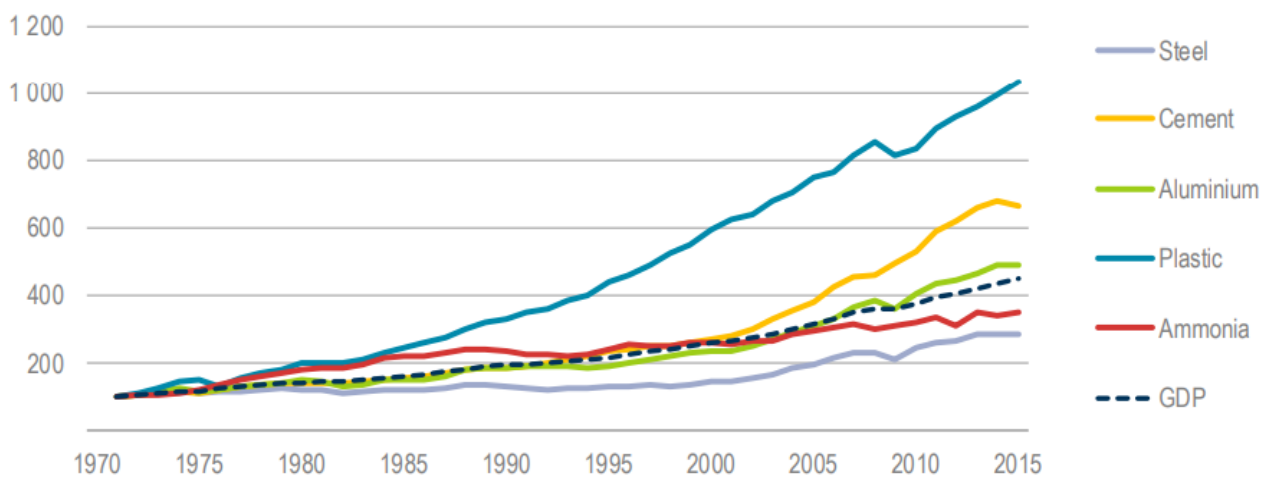


Fig. 1.2: Confronto, in percentuale, della produzione mondiale dei materiali più utilizzati.

Quando si parla di materiali polimerici, ci si riferisce ad un'ampia tipologia di materiali, anche molto diversi tra loro, non solo nelle proprietà ma anche nelle tecniche di lavorazione.

Tra questi, quelli che hanno avuto un maggiore sviluppo e diffusione sono i materiali termoplastici, come mostrato dalla figura 1.3.

Si trattano di materiali che possono essere riutilizzati più volte, basta fornire calore al materiale, dargli la forma che si desidera e farlo raffreddare.

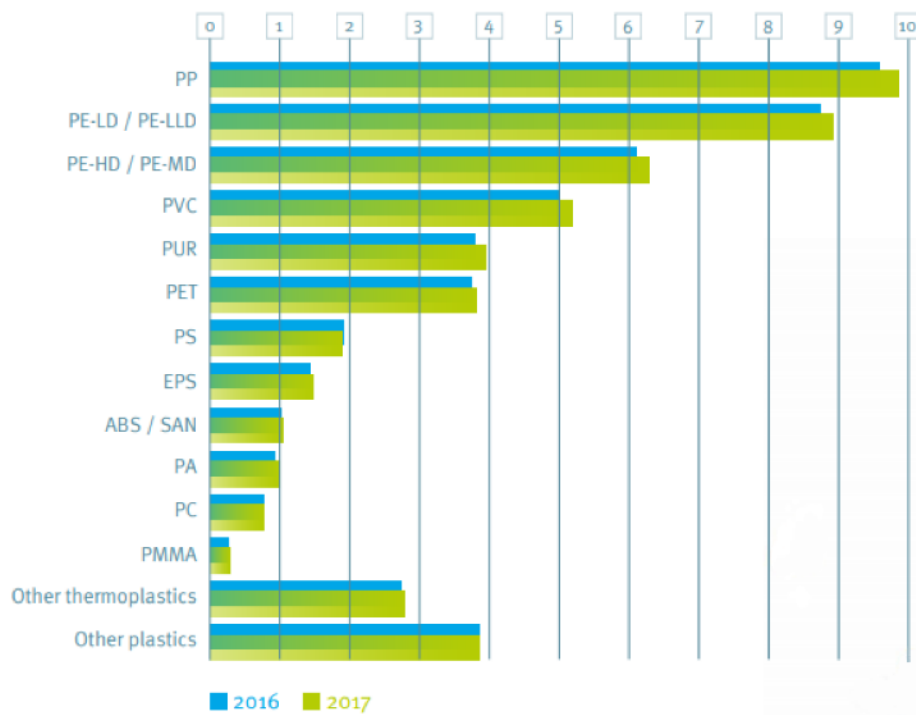


Fig. 1.3: Confronto delle quantità prodotte tra le diverse tipologie di materiali polimerici.

Le tecniche più utilizzate per trasformare questi materiali sono: stampaggio ad iniezione, termoformatura, soffiatura, calandratura, ecc. e ciascuna di queste, insieme alle apparecchiature di supporto alla lavorazione, sono state notevolmente sviluppate negli ultimi anni, sempre per cercare di ridurre i costi, l'impatto sull'ambiente e per aumentarne la produttività e la qualità.

Tra le varie apparecchiature che hanno subito un forte sviluppo troviamo le camere calde (anche dette canali caldi o hot runner). Si trattano di apparecchiature che sono montate negli stampi, per realizzare parti tramite lo stampaggio ad iniezione, e che permettono di:

- Ridurre, se non addirittura eliminare del tutto, la materozza;
- Ridurre il tempo ciclo;
- Migliorare la qualità dei manufatti.

Per avere un'idea dello sviluppo di questo settore basti pensare che nel 2002 solo il 30% degli stampi erano provvisti di questi sistemi. Solo dopo 3 anni questa percentuale è salita al 70%, e nel 2024 si prevede che il giro d'affari per questo settore possa sfiorare i 41 miliardi di dollari.

Le camere calde sono delle apparecchiature particolarmente complesse, costituite da molte parti, e perciò verranno descritte più nel dettaglio nei prossimi capitoli.

In questa tesi ci si è concentrati su una parte in particolare, l'attuatore che permette l'apertura e la chiusura della valvola detta *otturatore*.

In generale, per compiere questa operazione si utilizzano attuatori idraulici o pneumatici, i quali, sfruttando la forza generata da un fluido in pressione sulla superficie di un pistone, permettono di aprire e chiudere l'otturatore con forze e velocità molto elevate.

Se pur molto semplici e convenzionali, questi sistemi mostrano una serie di difetti che possono essere risolti tramite l'utilizzo di attuatori elettrici, che permetterebbero di realizzare sistemi di otturazione molto precisi, con una ripetibilità costante, un'alta forza di chiusura ed infine, dato che non si hanno fluidi in pressione, sarebbero molto più puliti e quindi renderebbero più semplice l'utilizzo delle camere calde per gli stampi che operano all'interno delle camere bianche.

Inoltre si valuteranno quali dovranno essere le prestazioni di un attuatore elettrico per poter sostituire quelli convenzionali, quale attuatore scegliere e infine si procederà con la progettazione di un sistema completo.

Questa tesi è il risultato del tirocinio svolto presso l'azienda iHR s.r.l. di Ancona, una realtà giovane, nata nel 2013, ma che negli ultimi anni è stata capace di ritagliarsi un posto di tutto rispetto all'interno di un mercato molto chiuso e competitivo, costituito per lo più da grossi player multinazionali. Il raggiungimento di questi risultati è stato possibile grazie ad una linea di prodotti completa, di alta qualità, che va incontro alle esigenze dei clienti e ai servizi post-vendita che l'azienda mette a disposizione.

2. Lo stampaggio ad iniezione

Come già detto nel capitolo introduttivo, quando si parla di materie plastiche, o di materiali polimerici, ci si riferisce ad un'ampia tipologia di materiali, classificati in diverse categorie, che nel corso degli anni sono stati lavorati tramite diverse tecnologie, come mostrato nella tabella 2.1.

Tuttavia i sistemi a camera calda vengono utilizzati per lo stampaggio ad iniezione dei materiali termoplastici, quindi per poter meglio comprendere il funzionamento dei sistemi a camera calda, e soprattutto le ragioni che ne hanno portato all'invenzione e ad una sempre maggiore diffusione, è necessario conoscere come avviene il processo di stampaggio ad iniezione e la struttura di uno stampo.

Polimeri Termoplastici	Polimeri Termoindurenti	Elastomeri
<ul style="list-style-type: none"> • Stampaggio ad iniezione; • Estrusione; • Calandratura; • Termoformatura; • Soffiaggio di corpi cavi; • Estrusione – soffiaggio; • Soffiaggio per immersione; • Iniezione – soffiaggio; • Stampaggio ad iniezione a bassa pressione (RIM); • Stampaggio rotazionale. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stampaggio a trasferimento; • Stampaggio ad iniezione; • Stampaggio a compressione; • Pultrusione; • Stampaggio per inietto – reazione; • Stampaggio rotazionale. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stampaggio per compressione; • Stampaggio per trasferimento; • Stampaggio ad iniezione.

Tab. 2.1: Metodi di lavorazione in base alla tipologia di polimero.

2.1 La pressa ad iniezione

La macchina per lo stampaggio ad iniezione dei materiali termoplastici viene chiamata *pressa ad iniezione*. Si tratta di un macchinario che per semplicità può essere visto come costituito da due parti, dette *gruppi*, che sono:

1. *Gruppo di chiusura dello stampo*: si tratta dell'insieme di organi della macchina che sostengono le due parti dello stampo, ne permettono l'apertura, la chiusura e generano le forze necessarie per mantenere chiuso lo stampo durante la fase di iniezione, contrastando la pressione del fuso polimerico iniettato nella cavità dello stampo.

Il gruppo di chiusura è costituito dai seguenti elementi:

- *Piastra fissa*. Si tratta di una piastra su cui viene montata la parte fissa dello stampo (in genere la matrice). Al suo centro è presente un foro che permette di collegare la boccola di iniezione dello stampo con l'ugello libero del gruppo di iniezione.
- *Piastra mobile*. Piastra sulla quale viene staffata l'altra metà dello stampo (in genere il punzone), e che è attaccata a degli organi che permettono di muoverla, così da poter aprire o chiudere lo stampo e trasmettere le forze necessarie a mantenerlo chiuso durante la fase di iniezione.
- *Organi moltiplicatori di forza*. Permettono di collegare la piastra mobile all'attuatore che genera la forza. In genere si trattano di meccanismi a ginocchiera che permettono di ottenere delle forze di chiusura maggiori rispetto alla forza generata dall'attuatore. Alcune tipologie di presse non ne sono provviste in quanto hanno l'attuatore direttamente collegato con la piastra e la moltiplicazione della forza viene realizzata sfruttando l'elasticità della struttura della pressa.
- *Attuatori*. Generano la forza necessaria per muovere la piastra mobile e gli estrattori dello stampo. In genere si trattano di cilindri oleodinamici, anche se negli ultimi anni vengono sempre più utilizzati motori elettrici combinati con viti a ricircolo di sfere.
- *Guide*.

A seconda di come è posizionato il gruppo, le presse vengono classificate in:

- *Orizzontali*: se il movimento della piastra mobile avviene in direzione orizzontale;
- *Verticali*: se tale movimento avviene in direzione verticale.

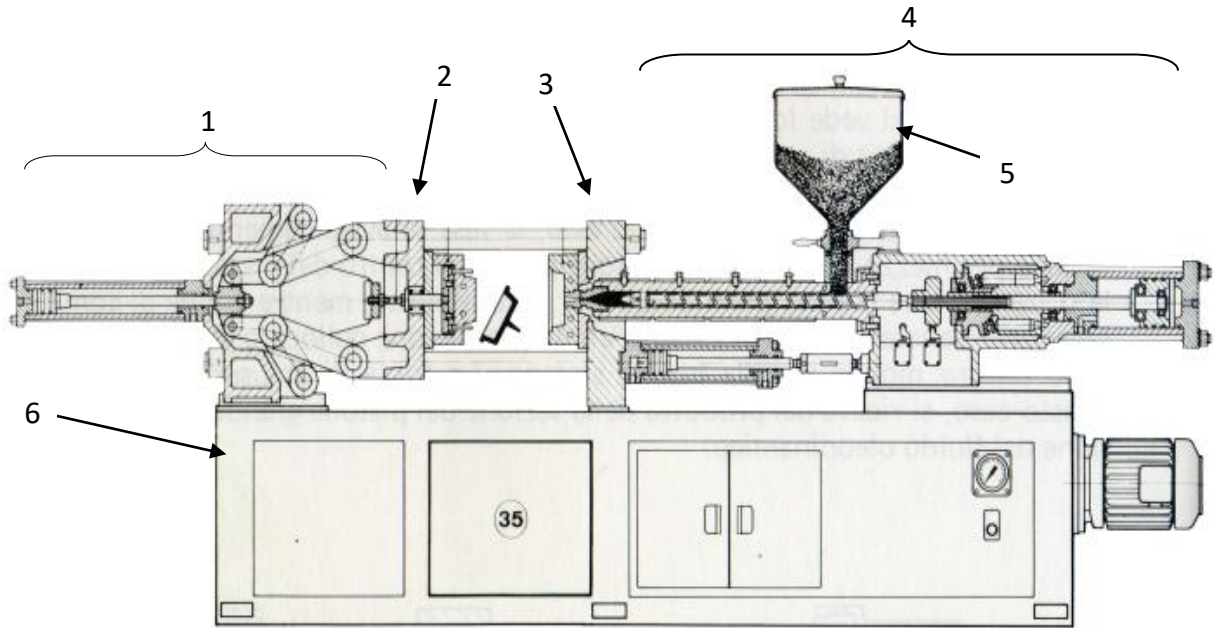


Fig. 2.1: Schema di una pressa ad iniezione. 1-Gruppo di chiusura; 2-Piastra mobile; 3-Piastra fissa; 4-Gruppo di iniezione; 5-Tramoggia; 6-Basamento.

2. *Gruppo di iniezione*: è l'insieme degli organi che permette di rammollire, plastificare e iniettare all'interno delle cavità dello stampo il materiale polimerico.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diverse tipologie di gruppi, tuttavia quello più diffuso oggi è il sistema a *vite punzonante*.

Si tratta di un sistema costituito da:

- *Cilindro di plastificazione*. È un cilindro di acciaio dove al suo interno avviene la plastificazione del materiale.
- *Resistenze di riscaldamento*. Sono delle resistenze elettriche che avvolgono il cilindro di plastificazione e che lo riscaldano in modo da avere al suo interno una temperatura che permette di rammollire il materiale al punto giusto per poter essere iniettato.
- *Vite di plastificazione*. Si tratta di una vite che ha un profilo particolare, che permette di far avanzare il materiale da un'estremità all'altra del cilindro e contemporaneamente lo plastifica, ovvero sottopone il materiale plastico ad un'azione di rimescolamento e compressione in modo da ottenere un fuso omogeneo. La vite per poter far ciò possiede due moti: uno di traslazione e uno di rotazione.
- *Valvola di non ritorno*. Si tratta di un cilindro che va montato intorno alla vite prima della punta e permette, durante la fase di iniezione, nella quale la vite trasla spingendo il materiale nello stampo, di non far ritornare il fuso indietro.

- *Attuatori*. Si trovano ad un'estremità del cilindro e forniscono alla vite il moto rotatorio e traslatorio. La maggior parte degli attuatori utilizzati sono di tipo idraulico ma, anche in questo caso, negli ultimi anni si stanno sempre di più utilizzando degli attuatori elettrici.
- *Ugello libero*. Si trova ad un'estremità del cilindro ed è la parte che permette di connettere il cilindro con i canali di alimentazione dello stampo.

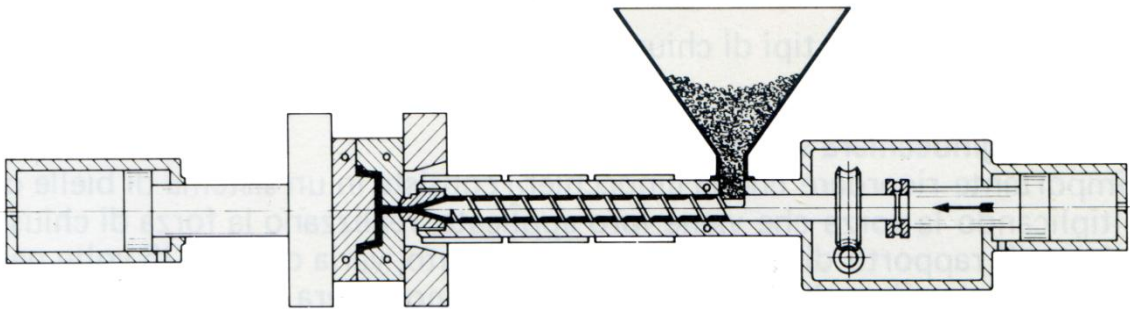


Fig. 2.2: Schema di un gruppo di iniezione con vite punzonante. All'estremità di destra si ha il riduttore che fa ruotare la vite durante la fase di plastificazione e il pistone che la spinge in avanti per iniettare il materiale nella cavità dello stampo.

Tutte le parti che sono state elencate vengono assemblate e montate su di un *basamento*, mentre gli attuatori vengono comandati tramite delle logiche di controllo che possono essere dei PLC, o addirittura dei CNC per le presse totalmente elettriche.

Le presse ad iniezione vengono classificate in base alla forza di chiusura che sono in grado di sviluppare, e solitamente viene espressa in tonnellate. Per una suddivisione più dettagliata poi, oltre alla direzione di traslazione della piastra mobile (verticale o orizzontale), si fa riferimento alla tipologia di attuatori installati. Da questo punto di vista, le presse vengono classificate in: idrauliche, elettriche e ibride, dove l'utilizzo degli attuatori elettrici e idraulici viene combinato in modo da ottenere un rendimento che sia il maggiore possibile.

2.2 Gli stampi

Con il termine stampo si indica l'utensile utilizzato per realizzare oggetti in plastica tramite stampaggio ad iniezione. Si tratta di un insieme di elementi, ciascuno con una propria funzione, che insieme concorrono:

- a conferire al fuso polimerico le caratteristiche geometriche e di forma richieste;
- ad asportare il calore necessario alla sua solidificazione;
- ad estrarre il pezzo finito.

La scelta del tipo di stampo per la produzione di un determinato pezzo in materia plastica è il risultato di una attenta valutazione degli elementi e dei dati che portano alla più conveniente soluzione del problema. Le considerazioni preliminari che devono essere effettuate si riferiscono a:

- Caratteristiche del pezzo da stampare, quindi: forma, dimensioni, tolleranze, peso, tipo di materiale plastico, ritiro previsto;
- Quantità di pezzi da produrre nell'unità di tempo;
- Scelta del sistema di stampaggio;
- Definizione di alcune caratteristiche dello stampo, come: tipologia, numero di impronte, sistema di estrazione, sistema di alimentazione;
- Scelta della pressa idonea;
- Definizione dei costi.

Da queste considerazioni si ottengono i dati e le caratteristiche preliminari che vanno a costituire la base da cui parte il progettista dello stampo per sviluppare e definire il disegno costruttivo dello stampo. Nel dettaglio, si andrà a definire la forma e le dimensioni del sistema di alimentazione, dove posizionare il punto di iniezione, come posizionare le impronte, come effettuare l'estrazione nello specifico e il numero e le dimensioni dei canali di raffreddamento.

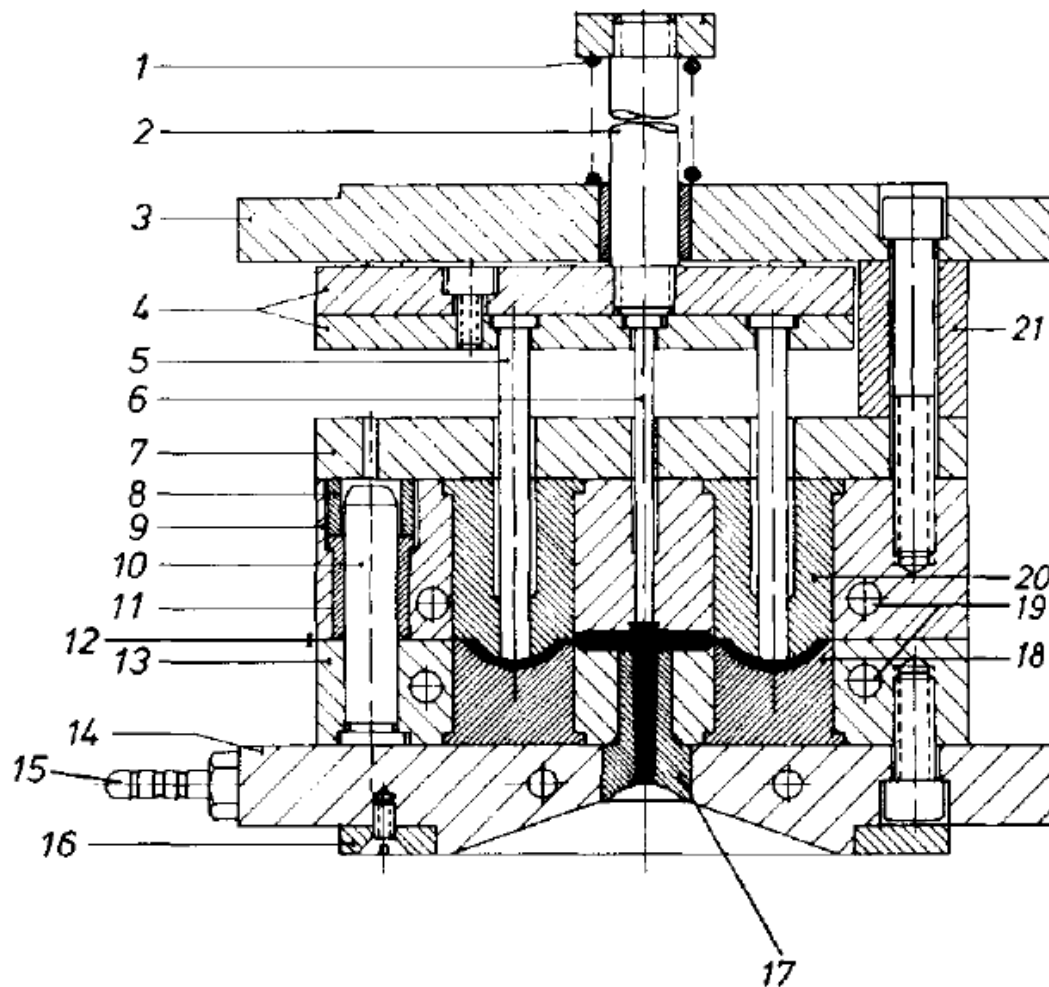


Fig. 2.3: Schema delle parti che costituiscono uno stampo. 1-Attuatore per l'estrazione; 2-Estrattore; 3-Piastra di staffaggio parte mobile; 4-Piattelli di estrazione; 5-Perni di estrazione; 6-Perno di estrazione materozza; 7-Piastra di supporto; 8-Boccola; 9-Parte mobile; 10-Colonna; 11-Boccola; 12-Linea di chiusura; 13-Parte fissa; 14-Piastra di staffaggio parte fissa; 15-Collettore liquido di raffreddamento; 16-Anello di centraggio; 17-Boccola di iniezione; 18-Inserto matrice; 19-Canale di raffreddamento; 20-Inserto punzone; 21-Distanziali.

2.2.1 Sistema di alimentazione del materiale

Il sistema di alimentazione di uno stampo è un insieme di componenti che permettono di collegare l'ugello libero del cilindro di plastificazione con le impronte dello stampo, creando così un percorso chiuso che guida il materiale plastico fuso dall'ugello libero di iniezione alle cavità dello stampo.

I componenti di base che costituiscono un sistema di alimentazione sono:

- Canale di iniezione (sprue);
- Canali di alimentazione (runner);
- Punto di iniezione (gate).

Il materiale plastico che durante la fase di raffreddamento solidifica all'interno del sistema di alimentazione prende il nome di *materozza*. Rappresenta uno sfrido di lavorazione, perciò un costo aggiuntivo che però non crea nessun valore aggiunto. Nel caso dei materiali termoplastici non è un grosso problema in quanto, tramite degli opportuni macchinari, è possibile frantumarla ottenendo così dei granuli di materiale, detti di seconda scelta, che poi vengono mescolati con il materiale vergine. In questo modo la materozza viene riutilizzata limitando gli sprechi.

Nel caso di materiali termoindurenti invece non può essere riutilizzata e deve essere quindi smaltita, andando così incontro a costi aggiuntivi.

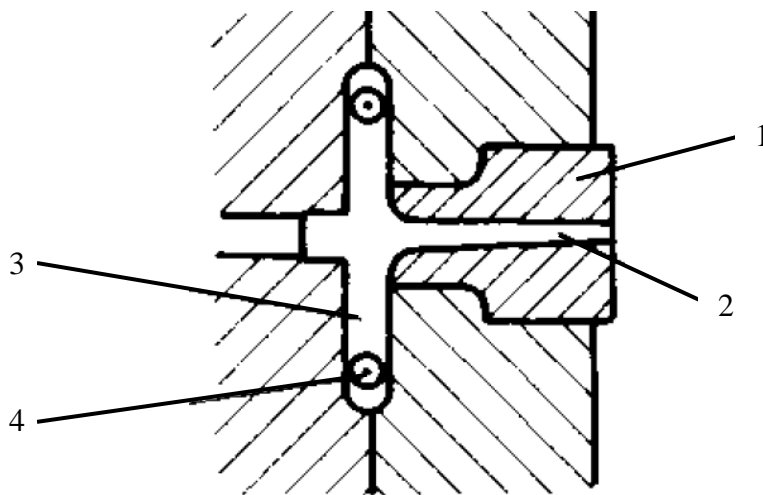


Fig. 2.4: Parti che compongono un sistema di alimentazione: 1-Boccia di iniezione; 2-Materozza; 3-Canale di alimentazione; 4-Punto di iniezione.

Durante la progettazione di uno stampo è compito del progettista scegliere il sistema di alimentazione che rappresenta il miglior compromesso tra qualità e costi. È possibile scegliere tra una vasta gamma di sistemi, perciò sono stati raggruppati in tre categorie:

- Sistemi in cui la materozza rimane attaccata con la parte stampata e che deve essere rimossa in seguito. Fanno parte di questa categoria i sistemi di iniezione più semplice, come quello *capillare* e a *diaframma*.
- Sistemi in cui la materozza viene separata dal pezzo stampato in automatico, come i sistemi di iniezione a *tunnel ricurvo* o a *sottomarina*.
- Sistemi in cui la materozza viene separata in automatico dal pezzo, ma rimane nel sistema mentre il pezzo viene estratto. Questo è il caso degli stampi *runnerless* o provvisti di *camera calda* (canali caldi) o *camera fredda*.

2.2.1.1 Canale di iniezione

Il canale di iniezione è la parte del sistema di alimentazione attraverso il quale il materiale plastico fuso entra all'interno delle cavità dello stampo. Il canale viene ricavato da una boccola, detta boccola di iniezione, che costituisce uno degli elementi dello stampo.

La funzione del canale di iniezione è quella di mettere in collegamento i canali di alimentazione con il cilindro di plastificazione della pressa, generando una chiusura stagna nella zona di contatto tra boccola e ugello libero di iniezione. In particolare, per avere un'ottima tenuta, il diametro dell'ugello deve essere più piccolo del diametro del canale di iniezione almeno di 1,5 mm.

Per queste ragioni le boccole di iniezione sono soggette a carichi molto elevati e per questo è una delle parti dello stampo che si usura più velocemente. Perciò devono poter essere facilmente sostituibili, fatta eccezione per le boccole delle camere calde, dove la superficie di contatto tra boccola e ugello è piana invece che curva, e devono essere realizzate con leghe di acciaio.

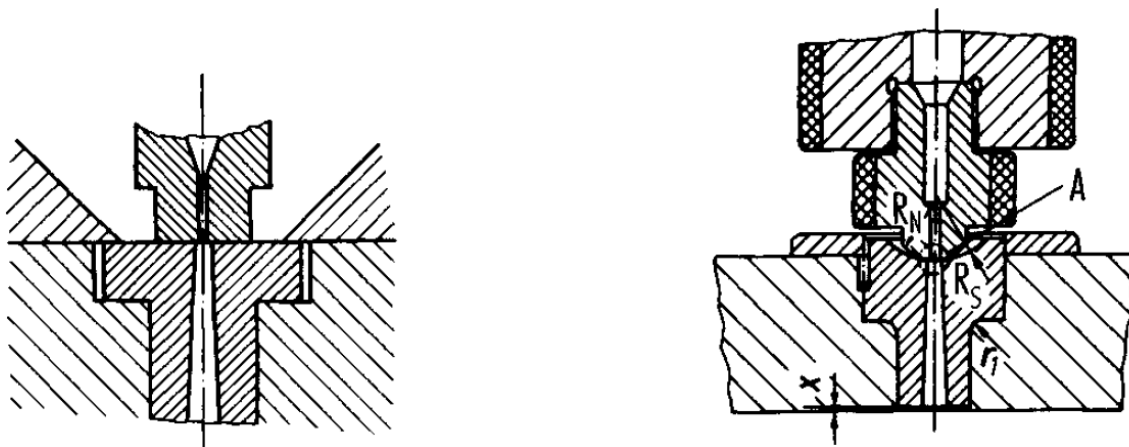


Fig. 2.5: Esempi di boccole di iniezione e ugelli liberi di iniezione.

Per minimizzare la dispersione di calore e la frazione di sfrido bisogna cercare di minimizzare il più possibile il diametro del canale di iniezione. Inoltre, per gli stampi a multi cavità è necessario prevedere un sistema che permette di estrarre dallo stampo la materozza. Questo in genere viene realizzato tramite un estrattore avente un particolare profilo, che permette di tirare fuori la materozza dal canale di iniezione durante la fase di apertura dello stampo.

In questo modo la *stampata* (termine con il quale si indica l'insieme di pezzo e materozza) rimane nella parte mobile dello stampo e viene successivamente estratta tramite l'ausilio degli estrattori o di altri metodi.

2.2.1.2 Canali di alimentazione

I canali di alimentazione sono la parte del sistema di alimentazione che collega il canale di iniezione con le cavità dello stampo, passando per il punto di iniezione. Negli stampi tradizionali vengono realizzati direttamente sulla piastra dello stampo, mentre negli stampi provvisti di camera calda vengono ricavati nel manifold.

Dai canali di alimentazione dipendono la qualità del pezzo stampato e alcuni parametri dello stampaggio come il tempo ciclo e la pressione di iniezione. Per questo è molto importante dimensionarli correttamente, scegliere la giusta forma e il giusto layout.

Per quanto riguarda le dimensioni, queste dipendono:

- Dallo spessore del pezzo stampato, che definisce il valore della sezione trasversale;
- Dalla dimensione e del numero delle impronte per quanto riguarda la lunghezza dei canali, che deve essere il minore possibile.

La forma della sezione trasversale deve essere scelta in modo da minimizzare la dispersione di calore, quindi la forma migliore è quella circolare. Tuttavia risulta difficile da realizzare alle macchine utensili e costosa, per cui si opta per soluzioni alternative che siano più semplici ed economiche da realizzare, e al tempo stesso limitino la dispersione di calore.

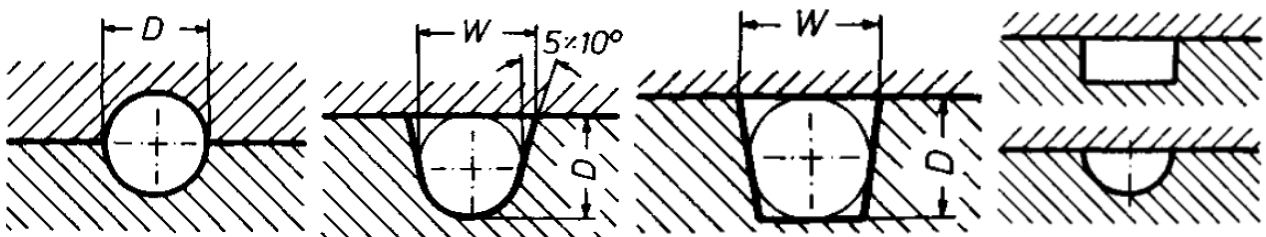


Fig. 2.6: Forme tipiche delle sezioni trasversali dei canali di alimentazione.

Mentre il layout dipende dalla forma del pezzo e dalla necessità di fare in modo che il materiale plastico fuso si trovi alle stesse condizioni di temperatura e pressione in ogni punto di iniezione e il tempo di riempimento di ciascuna impronta deve essere uguale.

2.2.1.3 Punto di iniezione

Il punto di iniezione è la parte del sistema di alimentazione che collega l'impronta dello stampo con il canale di alimentazione, ed è il punto più piccolo di tutto il sistema per una serie di ragioni che verranno illustrate in seguito.

La dimensione e la localizzazione del punto, rispetto alla cavità, vengono scelte considerando i seguenti requisiti:

- Deve essere il più piccolo possibile, ma senza andare a rovinare il materiale in fase di iniezione e senza generare una caduta di pressione troppo elevata;
- Deve permettere una semplice estrazione della stampata dallo stampo;
- Deve consentire una separazione automatica della materozza dal pezzo, senza lasciare bave o segni troppo evidenti sulla superficie del pezzo.

La dimensione del punto di iniezione è molto importante, in quanto, oltre a dover garantire il distacco della materozza senza intaccare la superficie del pezzo, deve permettere il riempimento completo delle cavità in un intervallo di tempo molto ristretto e senza rovinare il materiale.

Infatti durante la fase di iniezione il materiale plastico fuso viene spinto attraverso il punto, che è molto piccolo e quindi il materiale incontra una forte resistenza al flusso. Ciò fa sì che una frazione della pressione di iniezione viene dissipata in calore, producendo così due effetti positivi:

- 1° La fluidità del materiale aumenta. In questo modo riesce a riprodurre nel miglior modo possibile la forma dell'impronta;
- 2° La zona di metallo intorno al punto di iniezione si surriscalda, permettendo così al punto di iniezione di rimanere aperto per più tempo.

Altra scelta importante è dove localizzare il punto, o i punti, di iniezione. Questa scelta sostanzialmente è dettata da due requisiti: il primo di natura estetica, infatti il punto di iniezione, anche se molto piccolo, lascia sempre un piccolo punto che in certi oggetti, dove sono richieste caratteristiche estetiche di una certa rilevanza, potrebbe non essere accettato.

Il secondo requisito è di natura meccanica, infatti la localizzazione dei punti di iniezione va ad influenzare direttamente le proprietà meccaniche dell'oggetto stampato. In particolare bisogna andare a considerare due fenomeni:

- La direzione del flusso;
- Le linee di giunzione, anche dette di saldatura.

I materiali termoplastici sono costituiti da delle macromolecole dette *polimeri*, che a loro volta sono composte da un'unità, detta *mero*, che si ripete per un certo numero, detto *unità di polimerizzazione*, formando così una catena di atomi da cui si diramano altri atomi.

Quando il materiale viene iniettato all'interno di una cavità, il flusso viene orientato in una certa direzione e ciò fa sì che le macromolecole si orientino lungo questa. Questo fenomeno va ad influenzare notevolmente le proprietà meccaniche del pezzo e il ritiro in fase di solidificazione, in quanto si genera una forte anisotropia all'interno del pezzo stampato. Quindi in fase di progettazione dello stampo è molto importante considerare quale sarà l'utilizzo dell'oggetto da stampare, le direzioni più importanti delle forze a cui sarà soggetto e i valori di tolleranza, in modo da scegliere la localizzazione dei punti di iniezione che più si addice.

Le linee di giunzioni sono dei difetti che si generano sul pezzo, dovute a due o più fronti di materiale fuso che si incontrano e non riescono ad unirsi in modo perfetto, ovvero non si ha una compenetrazione reciproca dei due fronti. Questo genera una linea lungo il pezzo dove si hanno delle proprietà meccaniche differenti rispetto al resto, più scarse, e ciò potrebbe causare delle rotture del pezzo a carichi più bassi di quelli verificati.

Le ragioni di questo fenomeno sono dovute soprattutto alla presenza di ostacoli in punti molto distanti dal punto di iniezione, e alla presenza di più punti di iniezione distanti tra loro. Ciò fa sì che si sviluppino più fronti di materiale fuso che però quando si incontrano non riescono a saldarsi perfettamente.

Uno degli scopi dell'oggetto della tesi è proprio quello di risolvere il problema delle linee di giunzione. Infatti quando si hanno più punti di iniezione, e lo stampo è provvisto di camera calda, si può regolare il flusso di materiale iniettato tramite uno spillo che apre e chiude il punto di iniezione. In genere lo spillo viene comandato tramite attuatori oleodinamici o pneumatici, che però consentono un controllo di tipo on-off sullo spillo (aperto o chiuso), e se si vuole comandare ogni singolo attuatore ci vorrebbe una valvola per ciascuno di essi.

Sostituendo questi attuatori con uno elettrico sarebbe possibile avere un controllo maggiore dello spillo, si potrebbe così regolare la caduta di pressione del materiale ad ogni punto di iniezione e soprattutto si potrebbe realizzare una *iniezione a cascata*: in pratica il materiale viene iniettato all'inizio da un solo punto, e man mano che raggiunge gli altri punti di iniezione questi si aprono e iniziano ad iniettare, mentre i precedenti si chiudono. Questo modo permette di eliminare la presenza delle linee di saldatura sul pezzo, e di stampare pezzi molto grandi con meno energia.

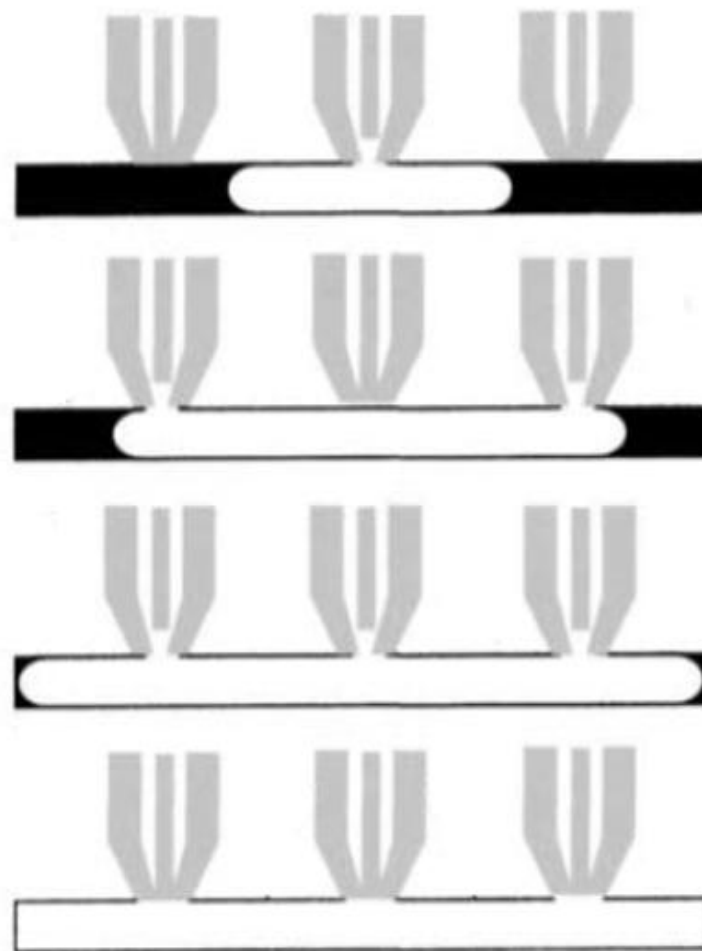


Fig. 2.7: Sequenza di un iniezione a cascata, anche detta sequenziale.

2.2.2 Sistema di estrazione

Terminata la fase di solidificazione del materiale, il pezzo e la materozza devono essere rimossi dalle cavità interne dello stampo. Ciò può avvenire solamente quando lo stampo è aperto e per mezzo di un sistema di estrazione in quanto, a causa della presenza di sottosquadri, forze di coesione e tensioni interne, il pezzo rimane attaccato allo stampo, e né l'apertura dello stampo né la forza di gravità sono sufficienti per rimuovere la stampata; mentre un'estrazione manuale può essere effettuata solamente quando si hanno piccoli lotti di produzione, altrimenti si avrebbero livelli di produttività troppo bassi.

Quindi, con il termine *sistema di estrazione* si indica l'insieme dei componenti che permettono di estrarre in modo automatico il pezzo e la materozza dalle cavità dello stampo.

2.2.2.1 Tipologie di sistemi di estrazione

Effettuare una classificazione dei sistemi di estrazione è molto complicato, in quanto per ogni pezzo bisogna prevedere un sistema di estrazione a sé. In genere i requisiti che guidano il progettista nella scelta del sistema di progettazione sono: la forma del pezzo da stampare, le dimensioni, la produttività minima per soddisfare la richiesta annua del pezzo ed infine richieste specifiche del cliente. Per questi motivi esistono un numero veramente elevato di sistemi di estrazione, ciascuno diverso dall'altro, tra cui sistemi molto complessi.

Tuttavia una prima suddivisione può essere effettuata in base alla tipologia degli attuatori utilizzati, si hanno allora sistemi:

- *Oleodinamici*. Sono quelli più comunemente usati dato che le presse per lo stampaggio ad iniezione sono provviste di un cilindro oleodinamico che, tramite un pistone, permette di muovere i perni di estrazione, rimuovendo così la stampata.
I martinetti idraulici vengono utilizzati per muovere i *tasselli*, ovvero delle parti dello stampo che si muovono per permettere l'estrazione di pezzi con sottosquadri.
- *Pneumatici*. Sono utilizzati molto raramente in quanto le forze che sono in grado di generare non sono molto elevate, mentre l'aria compressa viene spesso utilizzata in combinazione con i perni di estrazione, in modo da effettuare il distacco tra il pezzo e gli estrattori e per essere sicuri che l'impronta è stata liberata; oppure viene utilizzata direttamente per estrarre oggetti con una profondità elevata e piccoli angoli di sforno.

- *Meccanici.* Il moto degli estrattori avviene tramite sistemi che non prevedono l'utilizzo di fluidi in pressione. Un sistema molto utilizzato sono le molle, che in fase di apertura dello stampo spingono i perni di estrazione in avanti, spingendo via il pezzo. In questi casi bisogna prevedere dei perni che, durante la fase di chiusura, vanno a contatto con la parte fissa dello stampo prima degli estrattori.

Questi perni sono collegati al piattello su cui sono fissati tutti i perni di estrazione e perciò lo sposta all'indietro facendo rientrare i perni di estrazione. In questo modo si evita il contatto tra la superficie interna della cavità e gli estrattori. Lo svantaggio di questo sistema è che la costante elastica delle molle non è costante nel tempo, per cui dopo un certo numero di cicli si ha una variazione della forza di estrazione non più trascurabile e bisogna provvedere con il cambio delle molle.

Esistono anche altri sistemi di tipo meccanico ma in genere sono più complessi in quanto per muovere gli estrattori sfruttano il movimento di apertura dello stampo, e per far ciò utilizzano dei meccanismi a camma, a ginocchiera, quadrilateri e cremagliere. Tuttavia presentano il vantaggio di non aver bisogno di operazioni di installazione durante il montaggio dello stampo nella pressa permettendo così di ridurre il tempo di set-up della macchina e la percentuale di errori da parte degli attrezzisti.

- *Elettrici.* La scelta di utilizzare attuatori elettrici per i sistemi di estrazione è sempre più diffusa tra i progettisti e costruttori di stampi. Le ragioni sono la diminuzione dei costi e della complessità di questi attuatori, la minore complessità nel cablarli durante il set-up, permettono un maggiore controllo in termini di velocità e soprattutto non si hanno più perdite di olio, permettendo così di mantenere il luogo di lavoro pulito.

Per queste ragioni vengono soprattutto applicati negli stampi per i settori del packaging e degli articoli sanitari.

Gli attuatori elettrici maggiormente utilizzati sono i motori elettrici, che a loro volta vengono accoppiati a organi di trasmissione che trasformano il moto da rotatorio a lineare.

Un'altra classificazione può essere effettuata in base al modo con cui i pezzi vengono estratti dallo stampo, si ottiene così un elenco dei tipi di sistemi di estrazione maggiormente diffusi. Si hanno:

- *Sistemi standard.* Sono costituiti da dei *perni di estrazione* che vengono fissati tutti su una piastra, la quale a sua volta è fissata all'attuatore. In questo modo la corsa dei perni è per tutti uguale. Durante l'avanzamento del piattello i perni spingono il pezzo fuori dalla cavità, e sempre il piattello con l'attuatore provvedono a far rientrare i perni.

Dopo di che tramite il controllo della pressa è possibile scegliere il valore della corsa e il numero di corse.

Questi sistemi devono essere per forza realizzati nella parte mobile dello stampo perciò bisogna cercare di fare in modo che il pezzo rimanga attaccato alla parte mobile durante la fase di apertura.

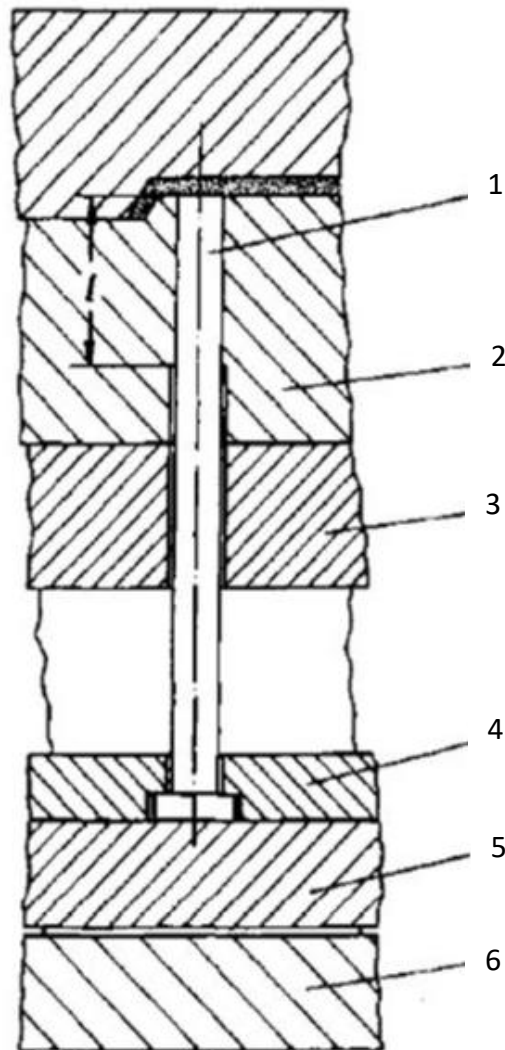


Fig. 2.8: Schema di un sistema di estrazione standard. 1-Perno di estrazione; 2-Punzone; 3-Piastra di supporto; 4-Piastra di ritegno; 5-Piastra di estrazione; 6-Piastra di fissaggio.

- *Sistemi con direzione di estrazione verso la parte mobile.* In genere i sistemi di estrazione vengono alloggiati nella parte mobile dello stampo, tuttavia alcuni articoli possono avere una forma tale per cui conviene stamparli in un certo modo, facendoli però rimanere attaccati alla parte fissa, come nel caso di bicchieri, scodelle, secchi, ecc.

In questo caso l'estrazione viene effettuata tramite una piastra, inserita tra la parte fissa e mobile, collegata alla parte mobile dello stampo tramite un *trascinatore*.

Il trascinatore non è altro che un perno con dei dischi fissati alle estremità. Il perno viene fatto scorrere all'interno di una boccola, montata nella parte mobile dello stampo, mentre un'estremità viene fissata alla piastra mobile di estrazione.

Durante la fase di apertura dello stampo, la parte mobile scorre fino a quando il disco montato sull'altra estremità del perno va a contatto con la boccola, in questo momento inizia a tirarsi dietro anche la piastra di estrazione, rimuovendo il pezzo dall'impronta. Il ritorno avviene mediante il contatto tra parte mobile dello stampo e piastra di estrazione durante la fase di chiusura dello stampo.

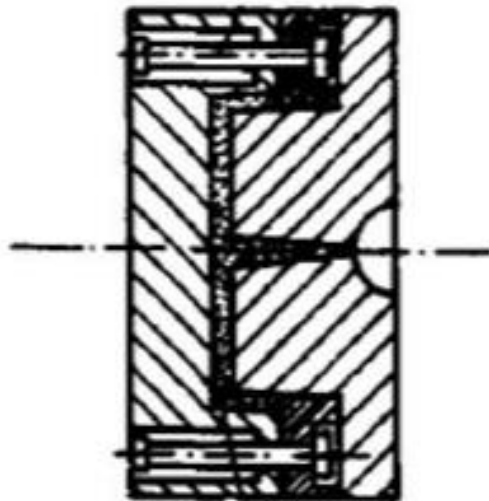


Fig. 2.9: Schema di un sistema di estrazione con trascinatore.

- *Sistemi a piastre*. Lo stampo è provvisto di più piastre mobili, sempre montate tra la parte fissa e mobile dello stampo, e sulle quali vengono ricavate le cavità per le impronte e per i canali di alimentazioni. Anche in questo caso le piastre vengono movimentate tramite dei trascinatori.

L'utilizzo di questi sistemi permette il distacco automatico e sicuro della materozza dai pezzi, infatti l'iniezione avviene tramite sottomarina e i canali di alimentazione si trovano compresi tra due piastre mentre i pezzi tra altre due, per cui all'apertura dello stampo avviene il distacco.

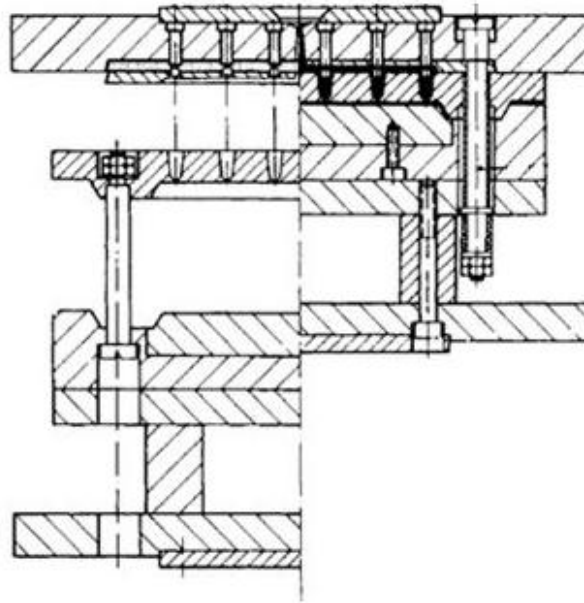


Fig. 2.10: Sistema di estrazione a tre piastre.

- *Sistemi per estrazione di parti con sottosquadri.* Alcuni pezzi hanno delle forme tali per cui non si riescono ad evitare i sottosquadri, ovvero parti del pezzo da stampare che ne impediscono l'estrazione in quanto sono ostacolati dallo stampo.

Per eliminare questo problema si realizza quella parte di stampo su di un blocco, detto *tassello*, che può scorrere. In questo modo il pezzo è completamente libero e può essere rimosso dall'impronta. Lo scorrimento dei tasselli può avvenire tramite componenti meccanici, come colonne inclinate, camme, carrelli, ecc. che sfruttano il movimento di apertura dello stampo; dove l'applicazione di questi sistemi non è possibile si utilizzano attuatori oleodinamici o elettrici.

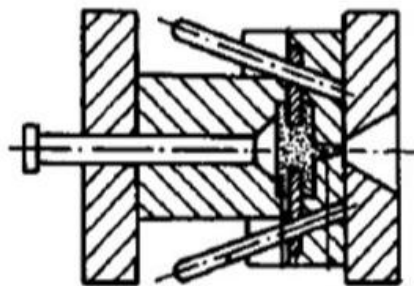


Fig. 2.11: Sistema di estrazione con colonne per spostare i tasselli in fase di apertura stampo. In questo modo si riescono a stampare oggetti con sottosquadri.

- *Sistemi per l'estrazione di pezzi filettati.* La parte di stampo che forma il filetto è filettata, quindi per poter estrarre il pezzo, senza rovinare il filetto, bisogna effettuare uno svitamento. Bisogna quindi dotare gli inserti filettati dello stampo di moto rotatorio. La complessità di questi sistemi è correlata al numero di impronte.

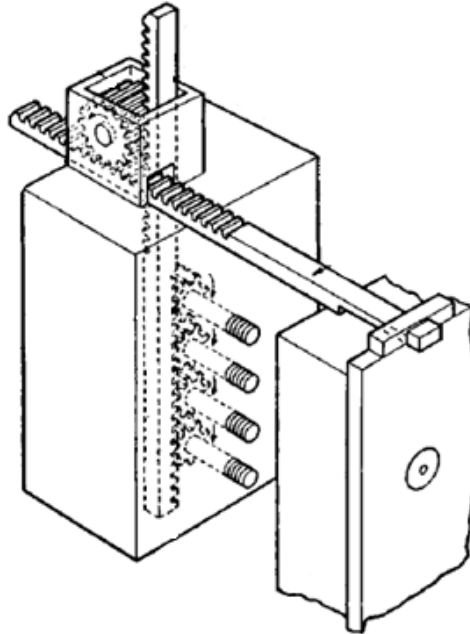


Fig. 2.12: Sistema di estrazione per pezzi filettati.

- *Valvole aria.* Sono delle valvole molto piccole che vengono alloggiare nella superficie dell'impronta dello stampo, formando un unico blocco in modo da non lasciare segni troppo evidenti sulla superficie del pezzo. Da queste valvole esce un getto di aria compressa che permette di staccare il pezzo dal punzone. La chiusura avviene tramite una molla.

Questo sistema viene utilizzato quando si hanno oggetti con cavità molto profonde e angoli di sforno molto piccoli, per cui un'estrazione meccanica è insufficiente ad estrarre il pezzo senza romperlo, in quanto al suo interno si viene a formare una condizione di vuoto.

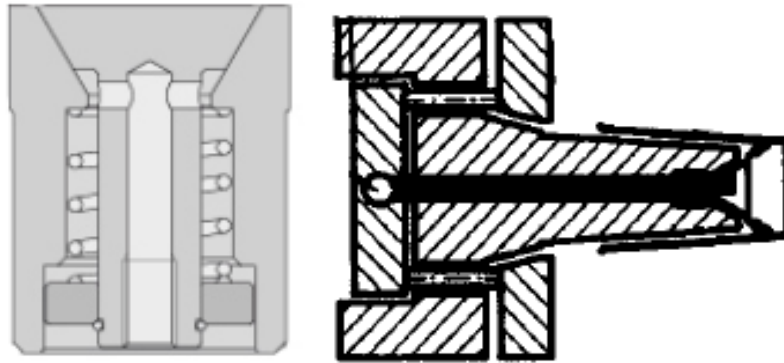


Fig. 2.13: Nell'immagine a sinistra la sezione di una valvola, a destra il sistema installato in uno stampo.

2.2.3 Sistema di raffreddamento

Il materiale plastico viene iniettato nelle cavità dello stampo allo stato fuso, per cui si trova ad una temperatura molto più alta rispetto alla temperatura ambiente, perciò già durante la fase di iniezione il fuso inizia a cedere calore alle pareti delle cavità dello stampo, che per conduzione lo cede all'ambiente circostante. Per poter estrarre il pezzo il materiale deve essere solidificato, deve quindi aver ceduto una notevole quantità di calore allo stampo, che nel frattempo aumenta di temperatura.

Maggiore è la temperatura a cui si trova lo stampo, maggiore è il tempo di solidificazione e quindi si avranno valori di produttività sempre più bassi. Questo è il primo motivo per cui bisogna realizzare nello stampo un sistema che sia in grado di smaltire il calore che viene ceduto dal fuso. In questo modo si ottengono tempi di raffreddamento più brevi.

Tuttavia non si può esagerare nel ridurre i tempi di solidificazione in quanto si rischia di non dare sufficiente tempo alle macromolecole di riorganizzarsi, ottenendo così un pezzo con una forte anisotropia che può causare proprietà meccaniche diverse da quelle che ci si aspetta e valori di ritiro che variano in base alla direzione. Per questi motivi non basta semplicemente raffreddare lo stampo ma bisogna regolarne la temperatura.

Il sistema di raffreddamento di uno stampo viene realizzato tramite una serie di fori ricavati nella parte fissa e mobile dello stampo, all'interno dei quali viene fatto scorrere un liquido, in genere acqua o olio, che dissipa il calore. A seconda della forma del pezzo il sistema di raffreddamento può diventare particolarmente complesso, in quanto si ha la necessità di asportare calore da punti in cui risulta impossibile realizzare un circuito tramite dei fori ottenuti tramite lavorazioni tradizionali.

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse soluzioni, come ad esempio i *raffreddatori a fontana* o a *lama*, rappresentati in figura 2.14; mentre l'avvento della manifattura additiva ha permesso la realizzazione di inserti con circuiti di raffreddamento ideali, che con le tecniche tradizionali sarebbero stati impossibili da realizzare, come mostrato in figura 2.15.

La temperatura di ingresso del liquido dipende dal tipo di materiale e viene ottenuta tramite un'apparecchiatura detta *centralina*, la quale tramite una resistenza elettrica porta il liquido alla temperatura desiderata.

Anche se nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi modelli analitici per il calcolo dello scambio termico che avviene in uno stampo, fra parete interna delle cavità che riceve calore dalla massa fusa ed il liquido, questo risulta essere ancora piuttosto complesso. Per queste ragioni nella maggior parte dei casi la progettazione di questi sistemi avviene in maniera empirica, basandosi sull'esperienza e sui dati riportati nelle schede tecniche del materiale.

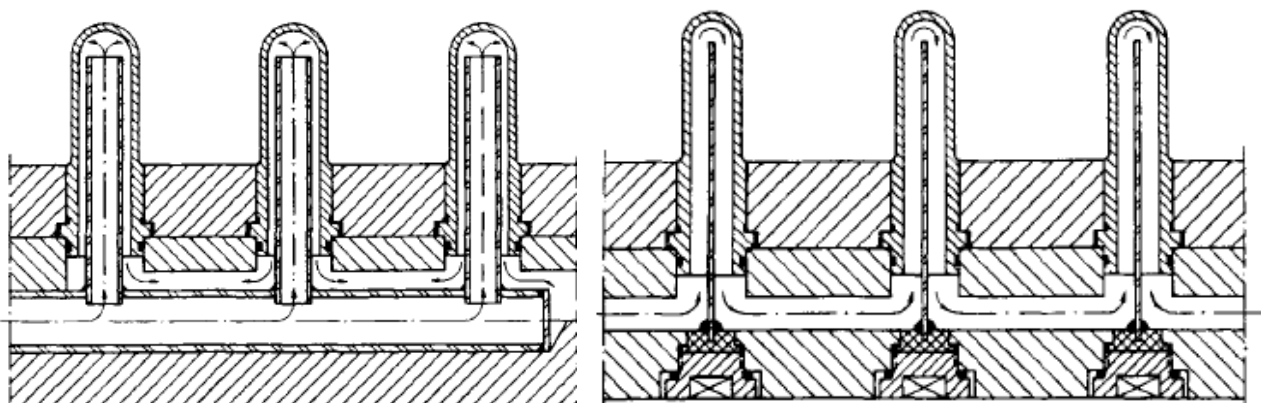


Fig. 2.14: Due casi di raffreddamento di inserti tramite raffreddatori a fontana (sinistra) e a lama (destra).

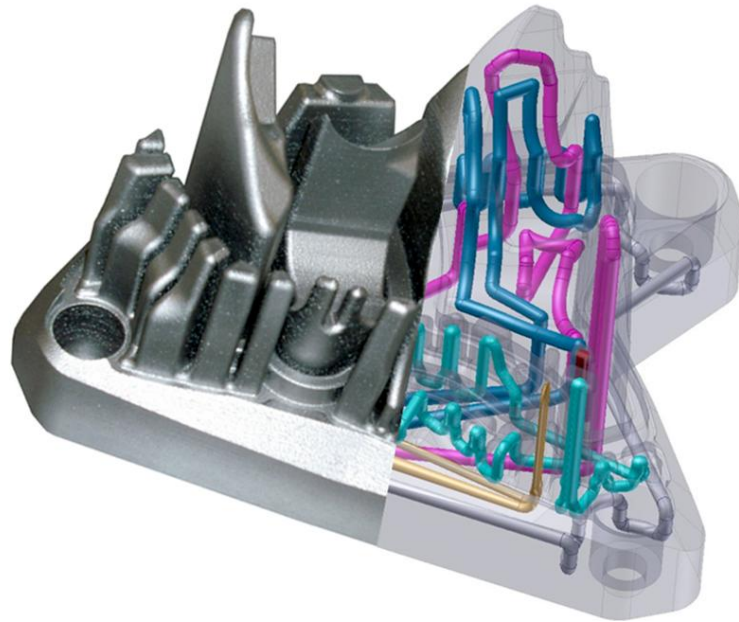


Fig. 2.15: Inserto realizzato tramite additive manufacturing, con circuito di raffreddamento interno. [Sito Renishaw, www.renishaw.com]

2.3 Il processo di stampaggio ad iniezione

Le fasi operative dello stampaggio, per una pressa ad iniezione a vite punzonante, sono le seguenti:

- 1) Chiusura dello stampo.
- 2) Iniezione: la vite, tramite un attuatore, viene spinta in avanti all'interno del cilindro, spingendo in questo modo il materiale plastificato dalla camera d'iniezione alla cavità dello stampo.
- 3) Plastificazione: si tratta della fase nella quale, dopo aver terminato l'iniezione, la vite inizia a ruotare, spingendo il materiale, dall'estremità del cilindro in cui vi entra alla camera d'iniezione. Durante questa fase, il materiale plastifica per effetto del calore generato dalle resistenze elettriche del cilindro, a cui va aggiungersi anche il calore dovuto alle forze di attrito tra plastica-vite-cilindro. La corsa di ritorno della vite, che avviene in questa fase, si verifica in seguito alla spinta provocata dal materiale e non per effetto di attuatori esterni.
- 4) Raffreddamento: in questa fase il materiale cede calore allo stampo, che lo disperde per mezzo delle superfici rivolte verso l'ambiente e tramite il liquido che scorre nei canali di condizionamento.
- 5) Apertura dello stampo ed estrazione dei pezzi.

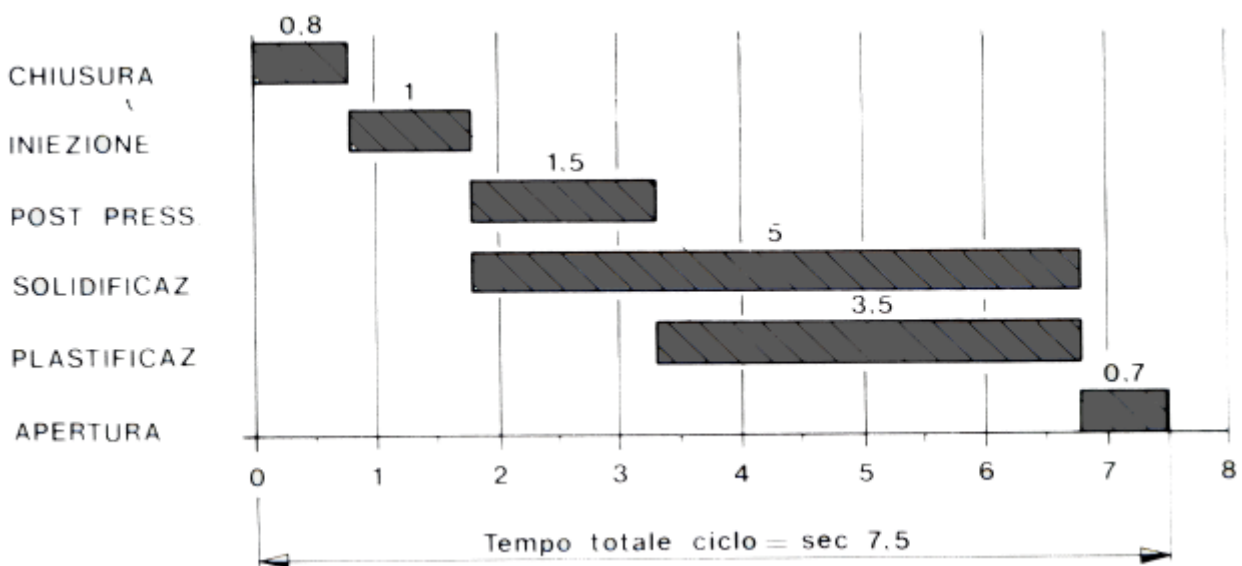


Fig. 2.16: Grafico dell'andamento dei tempi delle varie fasi dello stampaggio.

3. Le camere calde

Con il termine camera calda, canale caldo o hot runner, si indica un insieme di componenti, che assemblati insieme vanno a costituire un'unica apparecchiatura che viene integrata nello stampo, e che connette le cavità dello stampo con l'ugello libero di iniezione.

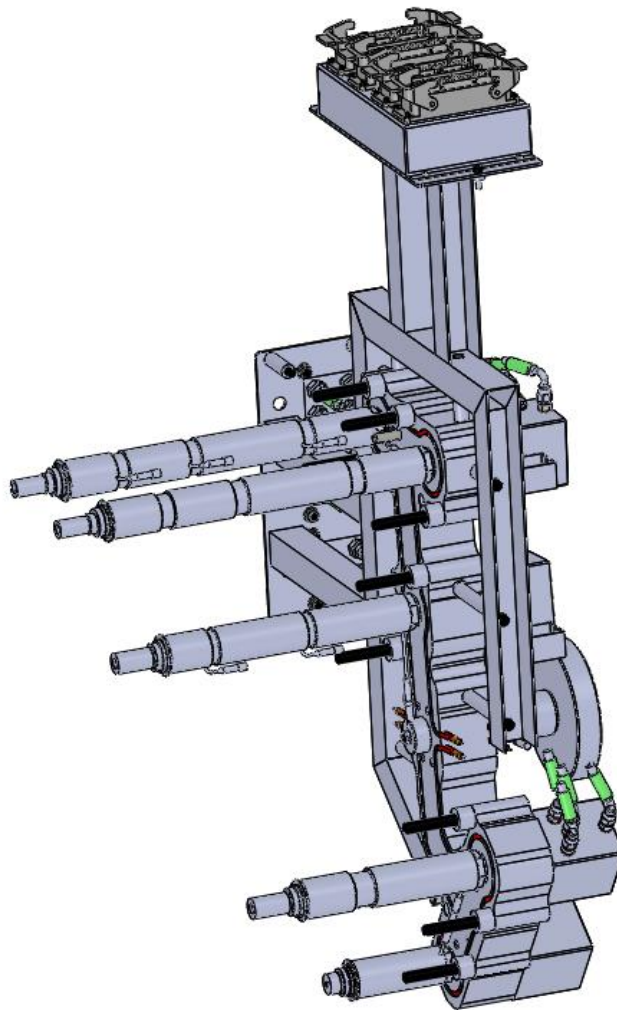


Fig. 3.1: Schema di una camera calda. [Disegno di iHR]

Si trattano di sistemi particolarmente complessi, in quanto operano in una condizione di carichi che variano in modo periodico nel tempo.

Sono sottoposti a pressioni interne che possono arrivare fino a 2500 bar, e a temperature che variano in un intervallo che è compreso tra i 200 e i 400 °C.

Per questo necessitano di una progettazione particolarmente complessa, che sia in grado di tenere in considerazione tutte queste variabili e che garantisca il più possibile il risultato finale desiderato; e di materiali performanti, che siano in grado di resistere a tali sollecitazioni.

Per queste ragioni i sistemi a canale caldo sono particolarmente costosi, senza contare anche il costo di utilizzo dovuto all'assorbimento della corrente elettrica da parte delle resistenze elettriche, degli attuatori e dei vari sensori.

Perciò in genere il loro utilizzo è giustificato soprattutto quando si hanno larghe produzioni di massa, o si devono stampare pezzi particolarmente complessi, per cui non si hanno altre alternative.

Tuttavia le camere calde permettono di ottenere una lunga serie di vantaggi: dall'eliminazione della materozza, alla riduzione del tempo ciclo fino alla possibilità di scegliere una pressa di taglia più piccola e pezzi di qualità maggiore.

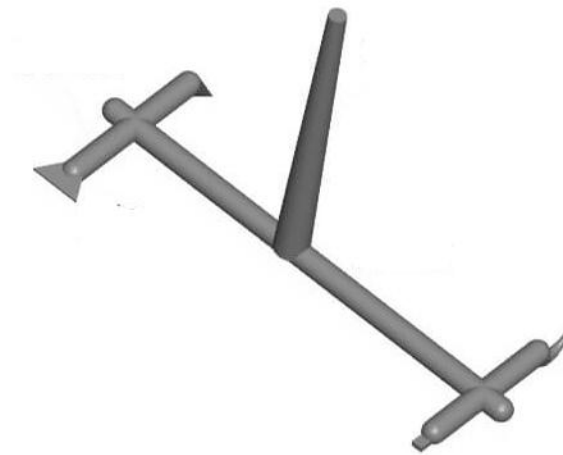


Fig. 3.2: Materozza con diversi tipologie di punti di iniezione.

3.1 Cenni storici

Verso la fine degli anni '40 le materie plastiche incominciarono ad essere largamente utilizzate nella produzione di oggetti, soprattutto negli Stati Uniti, dando vita così allo sviluppo dei vari processi tecnologici che già esistevano, e creandone degli altri.

Tra questi vi era lo stampaggio ad iniezione, che aveva (e continua ad avere) il problema della materozza, ovvero, una frazione dell'intera stampata che è costituita da plastica che si è solidificata all'interno dei canali di alimentazione e iniezione delle cavità, e che va a formare lo sfrido di lavorazione.

Dato che all'epoca questa frazione di materiale era piuttosto grande, per risolvere questo problema, in quegli anni, E. R. Knowles depositò il primo brevetto di uno stampo senza canali di alimentazione, incominciando così lo sviluppo dei sistemi a canale caldo, anche se siamo ancora molto lontani dal concetto che abbiamo oggi di queste apparecchiature.

Nel 1952 la Protective Cloueres Co. realizzò uno stampo per tappi dove nella parte fissa installarono una piastra elettrica riscaldante, in modo da tenere fuso il più possibile il materiale plastico che rimaneva all'interno dei canali di alimentazione.

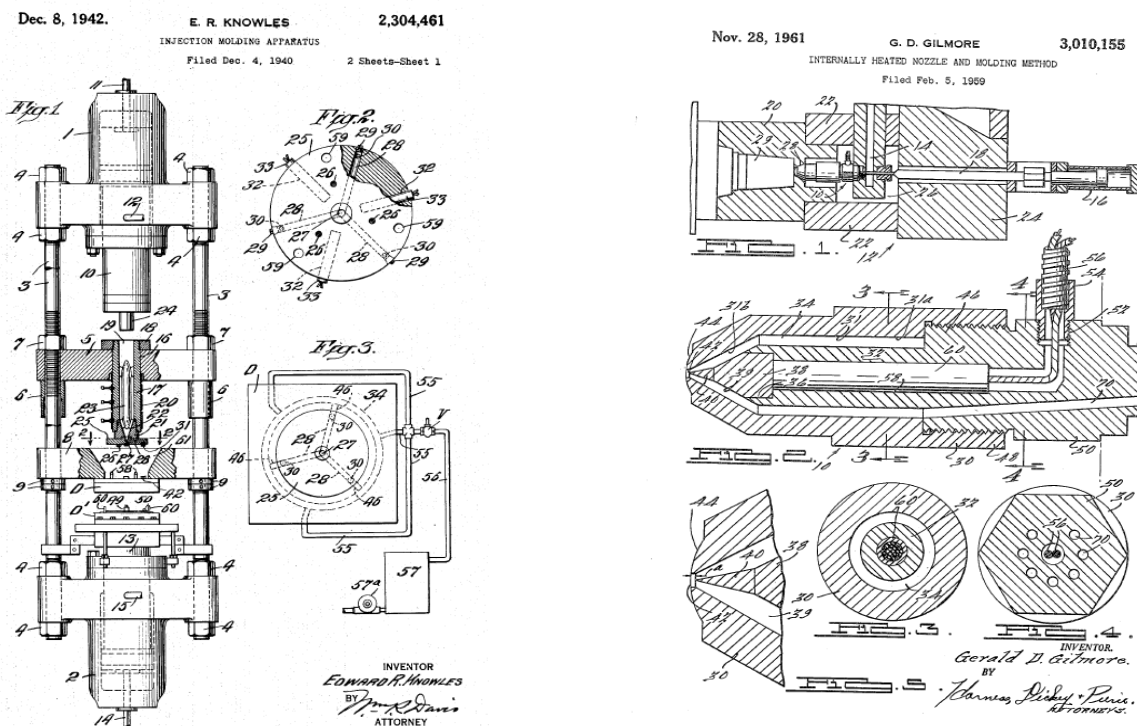


Fig. 3.3: Disegni delle prime camere calde brevettate negli anni '40 e '60.

Nel 1954 fecero la loro prima apparizione gli ugelli di iniezione e delle resistenze elettriche cilindriche che potevano essere installate intorno ai canali di alimentazione e agli ugelli, permettendo di fatto alla plastica di rimanere fusa per tutto il tempo, non solo nei canali di alimentazione, ma anche in quelli di iniezione.

Nel 1958, Gerald D. Gilmore (fondatore dell'azienda Incoe, ancora oggi una dei leader del settore), inventò un ugello di iniezione riscaldato, costituito da un unico blocco.

Nonostante il susseguirsi di varie invenzioni, la diffusione di questi sistemi rimaneva abbastanza limitata, soprattutto a causa del fatto che questi sistemi erano progettati e realizzati come parte integrante dello stampo, per cui risultava molto difficile e dispendioso effettuare le manutenzioni e soprattutto avevano una serie di difetti che ne sfavorivano l'utilizzo.

La svolta si ebbe nel 1963, quando la Mold-Masters Ltd. (azienda che oggi fa parte del gruppo Milacron) brevettò il primo sistema a camera calda commerciabile, ossia un sistema costituito da canali di alimentazione e ugelli riscaldati elettricamente, che i fabbricanti di stampi potevano acquistare e applicare al proprio stampo, senza stravolgere eccessivamente il progetto. La stessa azienda sviluppò anche diverse leghe metalliche che favorivano la trasmissione di calore e miglioravano la resistenza dei vari componenti, in particolare degli ugelli.

Tuttavia gli elevati costi e limiti tecnologici ne limitarono l'utilizzo solo su un numero ristretto di casi, basti pensare che secondo alcune stime nel 1978 solo il 15% degli stampi realizzati erano provvisti di sistemi a canale caldo.

L'aumento dei consumi delle materie termoplastiche, soprattutto in settori come quello del packaging e dell'automotive, dove sono richiesti tempi ciclo molto brevi, alta qualità e costi contenuti, hanno spinto notevolmente lo sviluppo di questi sistemi, reso possibile anche dallo sviluppo che nel corso degli anni c'è stato nelle lavorazioni meccaniche e nei materiali, e che hanno permesso di ridurre i costi e aumentare l'affidabilità, arrivando così ad una percentuale di stampi provvisti di sistemi a camera calda del 70%.

3.2 Vantaggi e svantaggi dei sistemi a camera calda

Anche se sono già stati accennati all'inizio del capitolo, si riprendono in maniera più dettagliata quelle che sono le ragioni che favoriscono l'utilizzo dei sistemi a camera calda e gli aspetti negativi.

- Vantaggi:
 - Si ha un minore consumo di materiale in quanto viene eliminata tutta, o in parte, la materozza, permettendo così di risparmiare sui costi del materiale e di smaltimento degli sfridi.
 - Si riduce il tempo ciclo, in quanto il volume di materiale che viene iniettato nelle cavità dello stampo è minore, perciò si ha una sensibile riduzione del tempo di solidificazione della stampata.
 - Lo stampaggio può essere effettuato con presse di taglia più piccola, permettendo così di risparmiare sui costi energetici. Anche questo è possibile grazie alla diminuzione del volume iniettato che consente di iniettare il materiale ad una pressione minore.
 - Il pezzo viene estratto dallo stampo già senza materozza.
 - I punti di iniezione possono essere localizzati nella posizione migliore in cui effettuare l'iniezione. Questo è possibile grazie ai canali riscaldati che permettono di far raggiungere al fuso polimerico qualsiasi punto all'interno dello stampo.
 - Si ottengono parti di qualità maggiore, infatti la possibilità di localizzare il punto di iniezione nella posizione più adatta, combinata con i sistemi di regolazione del flusso all'ugello consente di eliminare il problema delle linee di giunzione e di anisotropia del pezzo.
 - Il riempimento delle cavità può essere bilanciato in fase di iniezione andando a variare alcuni parametri come la temperatura o il flusso di materiale.
 - Il tempo di post-pressione può essere prolungato, permettendo di ridurre il ritiro del pezzo.
- Svantaggi:
 - I sistemi a camera calda sono molto complessi, in quanto richiedono molti accorgimenti e componenti. Ciò causa una maggiore complessità anche nella progettazione e costruzione dello stampo.
 - Il costo dello stampo è di molto maggiore rispetto ad uno stampo con sistema di iniezione tradizionale.
 - Si possono avere più probabilità di difetti e rotture con la conseguenza di avere dei costi di manutenzione più alti.
 - Alcuni materiali possono subire danneggiamenti dovuti ad una esposizione troppo prolungata alle alte temperature, specialmente in casi in cui si hanno tempi ciclo molto lunghi.

- E' necessario un elaborato controllo della temperatura, in quanto una distribuzione non uniforme della temperatura lungo i canali potrebbe causare un riempimento non uniforme delle cavità.
- Per azionare gli attuatori delle valvole a spillo e per controllare le temperature sono necessari strumenti aggiuntivi che vanno ad occupare spazio intorno alla pressa e allungano i tempi di set-up.

3.3 Componenti di un sistema a camera calda

Le camere calde sono delle apparecchiature costituite da molte parti, la cui nomenclatura viene definita tramite una norma. Secondo la DIN ISO 12165, le parti che costituiscono un sistema a canale caldo sono:

- 1- Piastra di bloccaggio;
- 2- Piastra fissa;
- 3- Estensione;
- 4- Boccola di iniezione non riscaldata;
- 5- Ugello riscaldato;
- 6- Valvola a spillo;
- 7- Resistenza elettrica;
- 8- Canale di alimentazione;
- 9- Manifold;
- 10- Dispositivo antitorsione;
- 11- Isolamento ad aria;
- 12- Guarnizione;
- 13- Disco distanziale;
- 14- Ugello Torpedo;
- 15- Cilindro realizzato nella piastra;
- 16- Cilindro;

- 17- Termocoppia;
- 18- Vite dell'ugello.

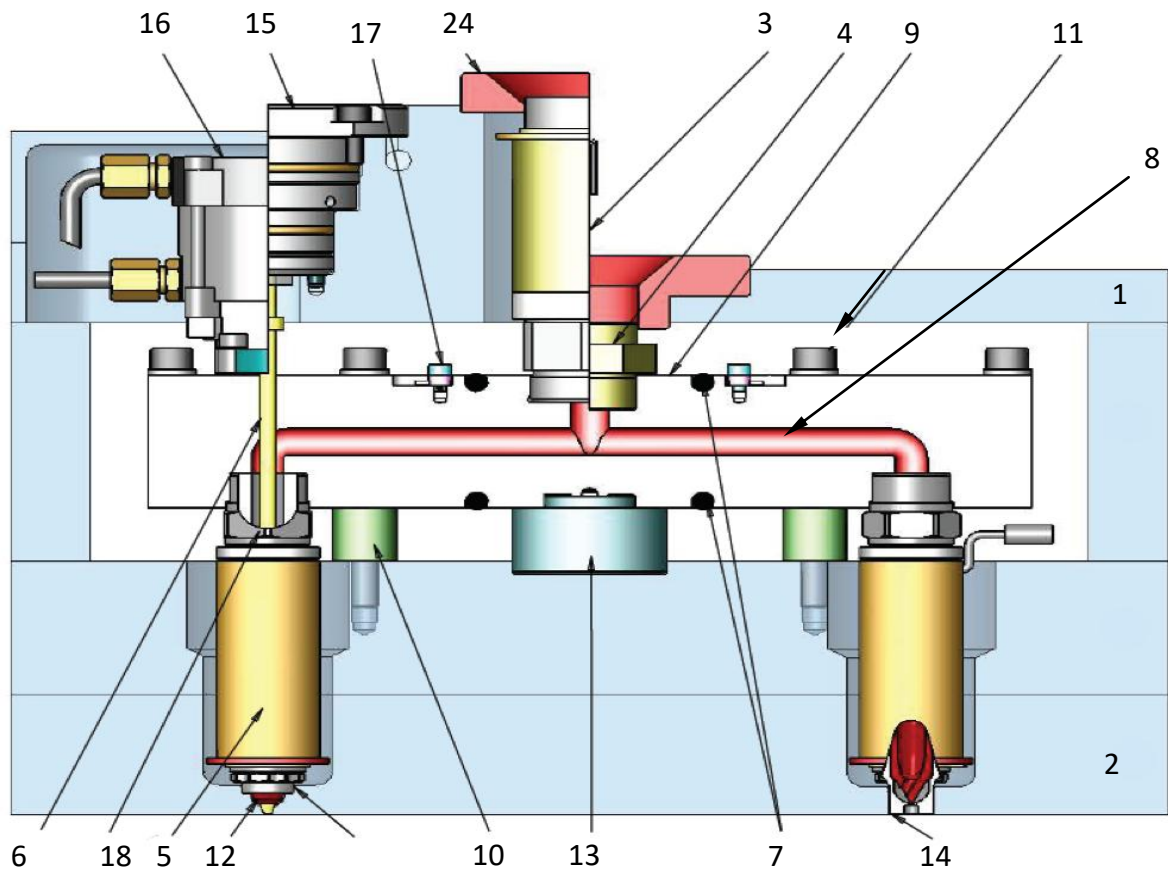


Fig. 3.4: Vista in sezione di uno stampo provvisto di camera calda, sia con otturatore (parte sinistra), sia con ugello aperto con punta (parte destra). [Immagine presa da catalogo: HRS]

Alcune di queste parti sono delle componenti molto importanti, per cui verranno trattati più dettagliatamente.

3.3.1 Manifold

Con il termine manifold si indica il blocco che permette di connettere la boccia di iniezione con gli ugelli di iniezione della camera calda, andando così a distribuire il materiale plastico fuso proveniente dall'ugello libero di iniezione alle varie cavità.

Per mantenere fuso il materiale questo blocco viene riscaldato tramite delle resistenze elettriche, che a seconda di dove vengono posizionate vanno a definire la tipologia di manifold:

- Manifold a riscaldamento esterno, se le resistenze vengono montate all'interno di canaline ricavate sulla superficie esterna del blocco;
- Manifold a riscaldamento interno, se le resistenze vengono inserite all'interno del canale.

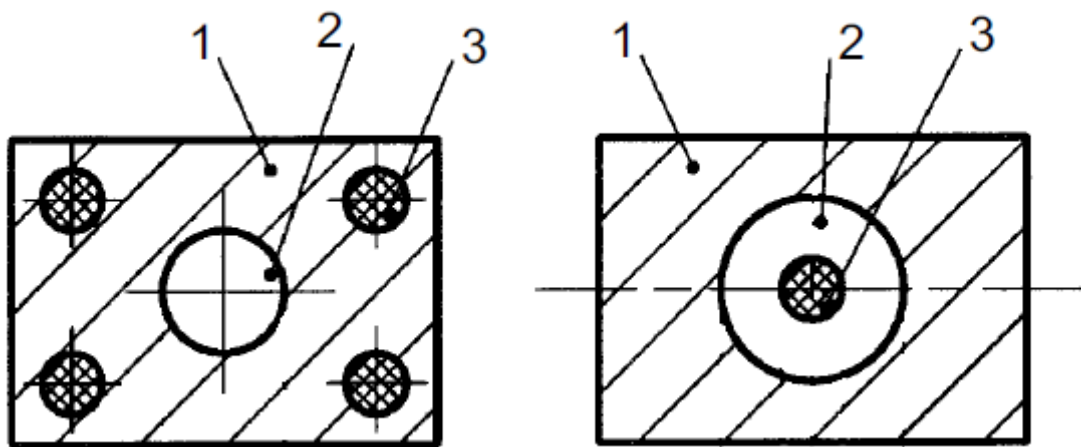


Fig. 3.5: Disegno di un manifold con resistenze esterne (sinistra) e resistenza interna (destra). 1-Blocco manifold; 2-Canale; 3-Resistenza elettrica.

La scelta di quale dei due sistemi bisogna adottare dipende da diversi fattori come:

1. Il consumo energetico. Montare la resistenza esternamente significa consumare molta più energia rispetto al manifold con la resistenza interna, in quanto il calore deve attraversare lo spessore di metallo che separa la resistenza dal materiale nel canale. Mentre se la resistenza viene inserita nel canale, direttamente a contatto con il fuso, la potenza assorbita sarà molto più bassa.
2. Le dilatazioni termiche. Si tratta di un fattore molto importante, soprattutto per i manifold con resistenze esterne.

In questo caso infatti si ha che il blocco in genere si trova ad una temperatura compresa tra i 100 e i 270°C, per cui le dilatazioni termiche che si ottengono non sono trascurabili e se non si prendono i giusti accorgimenti, andando ad inserire perni anti-torsione o ugelli flessibili, si possono generare dei disallineamenti e quindi punti morti o rotture.

Questo problema è meno marcato nei manifold con resistenze interne in quanto le temperature sono più basse, si ha una dispersione verso le zone circostanti minori, per cui non si ha bisogno di tutti i vari accorgimenti.

3. L'area della sezione trasversale. Nei manifold a riscaldamento esterno si fa in modo di avere la sezione che consente di ottenere il miglior compromesso tra perdita di pressione e tempo di permanenza del fuso nei canali, mentre nei manifold a riscaldamento interno la sezione è più piccola a causa della presenza della resistenza, quindi se da una parte si ottengono tempi di permanenza del fuso nei canali minori, dall'altra parte si hanno valori di portata elevati che potrebbero causare danni al materiale.

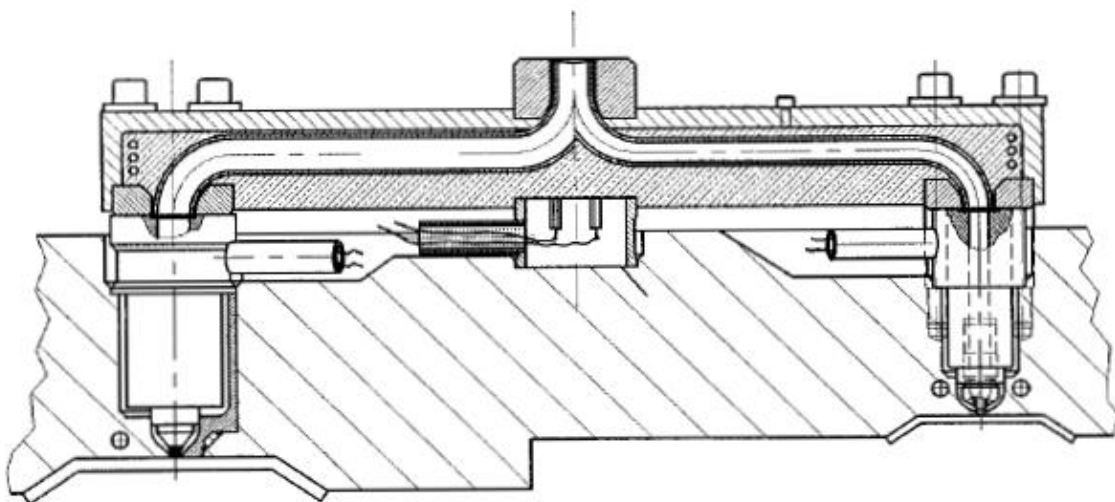


Fig. 3.6: Schema di un manifold con ugelli montati.

Per quanto riguarda invece la progettazione dei manifold, bisogna considerare i seguenti requisiti:

1. La temperatura lungo il canale di alimentazione deve essere il più omogenea possibile, in quanto la presenza di zone del manifold a temperature differenti potrebbe causare uno sbilanciamento dell'iniezione.
2. Il materiale all'interno dei canali non deve degradarsi, quindi bisogna valutare attentamente il tempo di permanenza nei canali del materiale ed evitare la presenza di punti morti.

3. Non si devono avere punti morti all'interno dei canali e/o adottare soluzioni tecnologiche che potrebbero generarli.

Per punti morti si intendono dei punti lungo il canale di alimentazione in cui il materiale si arresta, ristagna e non riesce più a fluire. Possono diventare punti morti ad esempio le curve dei canali o le giunzioni.

I problemi che possono generare sono: difetti dei pezzi, dovuti a frazioni di materiale degradato che sono riuscite a rimettersi nel flusso, e difficoltà durante le operazioni di cambio colore.

4. Le perdite di pressione lungo i canali di alimentazione devono essere minimizzate e devono essere rese uguali per tutti i canali.

5. Negli stampi multi-impronta per ottenere parti uguali, con le stesse caratteristiche, è fondamentale che le condizioni durante l'iniezione siano uguali per tutte le cavità. Perciò è fondamentale che i canali siano bilanciati e questa condizione si ottiene nel miglior modo tramite il bilanciamento naturale, ovvero la lunghezza e la sezione dei canali deve essere uguale per tutti, in modo che le perdite di pressioni e il gradiente di temperatura siano le stesse per ogni punto di iniezione.

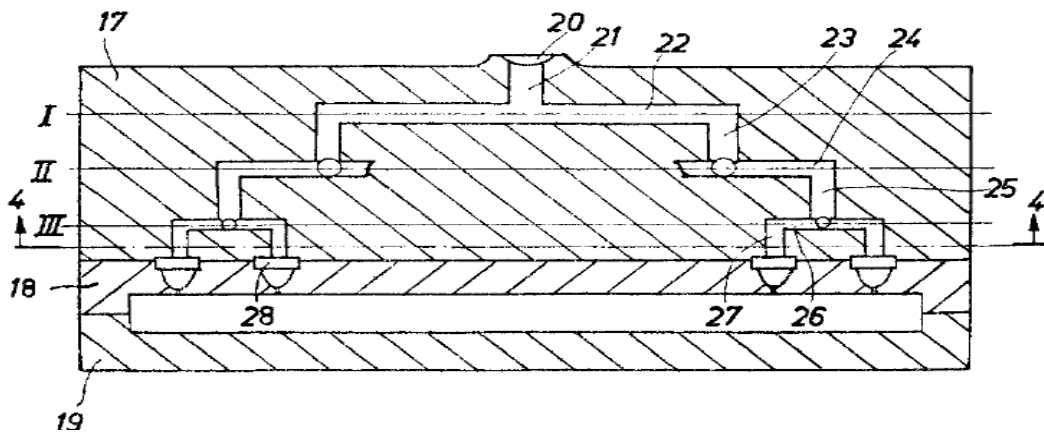


Fig. 3.7: Manifold bilanciato in modo naturale, costituito da tre livelli.

3.3.2 Foglio isolante termico

Per ridurre la dissipazione di calore dal manifold all'ambiente circostante si utilizzano dei fogli di materiale isolante, o di alluminio, che vengono applicati intorno al blocco. Questo, oltre a ridurre l'energia assorbita dalle resistenze, permette di ottenere una distribuzione della temperatura migliore. Quando invece si vuole creare un forte isolamento, si realizza un'intercapedine d'aria tra il manifold e il pannello isolante, tramite l'utilizzo di un distanziale.

3.3.3 Camera di fusione

La camera di fusione è una parte della camera calda che è costituita da una boccola nella quale viene montato l'ugello di iniezione del canale caldo. Le camere di fusione non sono obbligatorie per cui non sempre si trovano nei sistemi, tuttavia permettono un controllo maggiore della temperatura del sistema e una migliore separazione termica tra manifold e ugello del canale caldo. L'uso della boccola della camera di fusione richiede uno sforzo di progettazione e costruzione maggiore, tuttavia questo sforzo viene compensato da una maggiore stabilità del processo.

3.3.4 Elementi riscaldanti per le camere calde

Per mantenere fuso il materiale plastico all'interno dei canali di alimentazione dello stampo, nel manifold c'è bisogno di un insieme di elementi che permettono di portare l'intero blocco alla temperatura di lavorazione del materiale, data dal produttore, e di mantenere tale temperatura nel tempo, andando a compensare le perdite.

Esistono diverse tipologie di elementi riscaldanti:

- Riscaldatore a cartuccia cilindrica. Sono dei sistemi molto compatti che permettono di raggiungere densità di potenza molto elevate, nell'ordine dei 50 W/cm^2 . Sono costituiti da una guaina di protezione, in metallo, all'interno della quale si ha l'avvolgimento elettrico, separato dalla guaina da uno strato di isolamento elettrico. Possono essere provvisti di coppia termica.

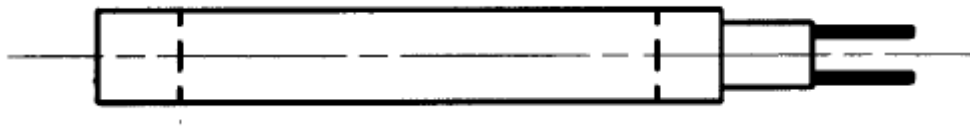


Fig. 3.8: Riscaldatore a cartuccia cilindrica.

- Riscaldatore a cartuccia conico. È uguale a quello cilindrico solo che la forma della cartuccia è conica, in questo modo si riesce a montarla con una precisione maggiore e la superficie di contatto tra cartuccia e manifold è più ampia.

- Riscaldatore a cartuccia filettato. Anche in questo caso l'unica cosa che cambia rispetto ai precedenti è che la superficie esterna della guaina è filettata, così da avere un montaggio più stabile e una superficie di scambio ancora più ampia.
- Riscaldatore tubolare. Sono la tipologia di riscaldatori più utilizzata per riscaldare i blocchi manifold, in quanto sono costituiti da una resistenza elettrica avvolta in una guaina di materiale conduttore. Dato che il diametro non è molto grande, è possibile piegarlo in modo da realizzare dei veri e propri percorsi che permettono di distribuire il calore nel manifold nel migliore modo possibile.

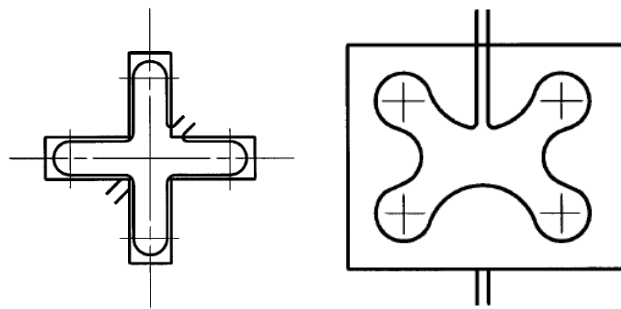


Fig. 3.9: Due esempi di come i riscaldatori tubolari possono essere piegati per riscaldare il manifold.

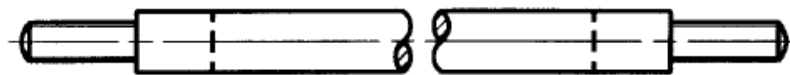


Fig. 3.10: Riscaldatore tubolare.

- Piastra riscaldante. Questo tipo di sistema permette di distribuire in modo omogeneo il calore su un'ampia superficie. Si trovano due tipologie di piastre:
 - o realizzate avvolgendo un nastro di resistenza al nichel-cromo attorno all'isolamento in alluminio e il tutto incapsulato in una guaina di acciaio inossidabile. Sono spesse diversi centimetri.
 - o film riscaldanti, che spesso sono fabbricati in un modo completamente diverso rispetto ai comuni elementi riscaldanti tubolari. Un film riscaldante è costituito da un substrato di acciaio inossidabile o ceramica (piastra), su cui viene stampato uno strato isolante, quindi uno strato di pasta resistiva, seguito da uno strato connettivo e infine tutti questi strati sono ricoperti da uno strato superiore di smalto (che fornisce protezione contro i danni meccanici).

I singoli strati vengono applicati mediante serigrafia e ogni strato viene asciugato e infornato in seguito. In questo modo si ottiene un film spesso pochi mm che permette così di raggiungere in poco tempo la temperatura richiesta.

- Riscaldamento indiretto tramite liquido. Il riscaldamento del manifold e delle altre parti della camera calda avviene attraverso un liquido che scorre all'interno del sistema, attraverso una serie di elementi che permettono di assorbire il calore del liquido e rilasciarlo alle varie parti. Questo sistema permette di utilizzare il calore proveniente da altri processi che quindi andrebbe perso, permettendo di ridurre i costi di esercizio della camera calda.

3.3.5 Ugelli a canale caldo

L'ugello è il componente della camera calda che collega i canali di alimentazione del blocco di distribuzione (il manifold) con il punto di iniezione della cavità. L'ugello in pratica è la parte terminale del sistema di canali che guidano il fuso polimerico dall'ugello libero di iniezione della pressa, attraverso il manifold, fino all'interno delle impronte dello stampo, e per questo motivo le sue caratteristiche sono fondamentali ai fini della qualità dell'oggetto stampato.



Fig. 3.11: Aspetto esterno di diverse tipologie di ugelli. [Immagine presa da sito iHR]

Proprio per andare incontro alle varie esigenze che ciascun oggetto ha, nel corso degli anni sono stati inventati e sviluppati diversi modelli di ugelli, ciascuno adatto per una tipica esigenza. Tuttavia è possibile fare un elenco delle proprietà che ogni ugello deve avere, indipendentemente dall'applicazione che se ne fa, in modo da ottenere parti di qualità e ridurre le problematiche. Queste caratteristiche sono:

1. La temperatura dell'ugello deve essere il più omogenea possibile, in modo da non avere delle differenze di temperatura che potrebbero generare dei difetti nello stampaggio. Per far ciò bisogna studiare attentamente il design dell'ugello, la disposizione dei riscaldatori elettrici e infine la zona di contatto tra ugello e piastra dello stampo. Quest'ultima in particolare si tratta di una zona molto sensibile dell'ugello, e del sistema a canali caldi in generale, che deve essere attentamente valutata e progettata per ragioni che verranno specificate successivamente.
2. Il foro interno all'ugello, dove scorre il materiale plastico fuso (canale di iniezione), non deve assolutamente avere dei punti morti, ossia dei punti dove il materiale potrebbe ristagnare e quindi degradarsi.

Ciò sostanzialmente significa che nell'ugello bisogna evitare curve con raggio troppo piccolo e sarebbe opportuno che il canale sia realizzato su di un unico blocco e non da più parti, infatti a causa delle dilatazioni termiche e delle sollecitazioni a cui il sistema è sottoposto potrebbero nascere dei disallineamenti, e quindi dei micro-spigoli su cui il materiale potrebbe arrestarsi. Quanto detto è importante ai fini del cambio colore e per minimizzare le perdite di pressione all'interno del canale.

3. I materiali utilizzati per realizzare le varie parti dell'ugello devono possedere delle ottime proprietà. Devono avere un'elevata resistenza a rottura, in quanto il corpo è soggetto a sollecitazioni molto elevate, un'alta resistenza a fatica in quanto i carichi sono ciclici, in un ambiente ad alta temperatura. Le materie plastiche allo stato fuso possono liberare dei gas che possono essere molto corrosivi, per cui devono avere una buona resistenza alla corrosione; ed infine devono essere scelti in base alla dispersione di calore che si desidera avere in una determinata zona.
4. Le superfici di contatto ugello-stampo e ugello-manifold devono essere assolutamente a tenuta stagna per non avere perdite di plastica all'interno dello stampo.

Da ciò si può dedurre che la progettazione e costruzione di un ugello non sono operazioni semplici, infatti richiedono non solo un'elevata conoscenza tecnica teorica, ma anche un'elevata esperienza, sia per progettargli che per costruirli, in quanto non sempre i concetti teorici riescono a rispondere in maniera esaustiva ad alcune problematiche, mentre per quanto riguarda la realizzazione, sono necessarie lavorazioni ad alta precisioni, con l'utilizzo anche di macchine speciali.

Infine, i diversi modelli di ugelli disponibili in commercio possono essere classificati nel seguente modo:

- Ugelli Aperti:
 - o Ugelli completamente aperti;
 - o Ugelli con punte (torpedo);
 - o Ugelli multipli:
 - Verticali;
 - Orizzontali;
 - Obliqui;
 - Edge.
- Ugelli con valvola.

3.3.5.1 Ugelli Aperti

Fanno parte di questa tipologia tutti gli ugelli che non presentano nessuna ostruzione meccanica al flusso del fuso polimerico, ovvero il punto di iniezione (il gate) rimane sempre aperto. Quindi il principio su cui si basano questi ugelli è lo stesso degli stampi senza camere calde ovvero, dopo l'iniezione il gate, che è il punto più piccolo di tutto il sistema dei canali di alimentazione, si solidifica, sigillando di fatto la cavità dal resto del sistema. In questo modo è possibile effettuare l'estrazione del pezzo senza che ci siano bave o filamenti.

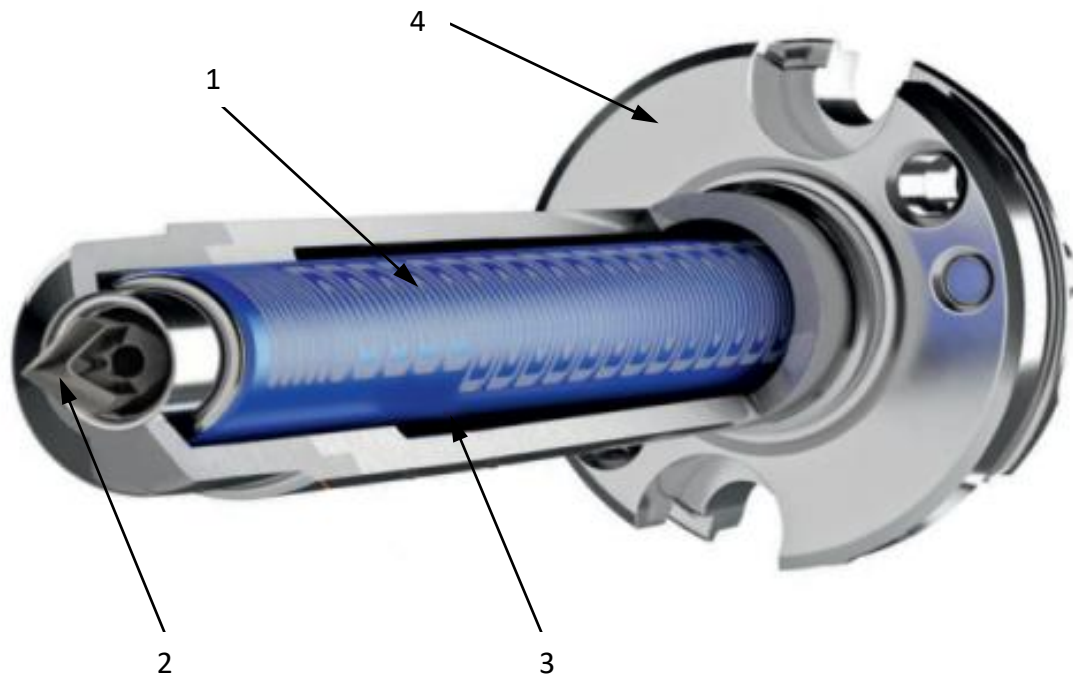


Fig. 3.12: Ugello aperto con punta. 1-Resistenza elettrica; 2-Punta; 3-Spessore d'aria; 4-Flangia. [Immagine presa da catalogo Guenther]

Esistono diversi modelli di ugelli aperti, tuttavia possono essere classificati in tre categorie:

- Ugelli completamente aperti: sono la tipologia di ugello a canale caldo più semplice ed economica disponibile. Non sono altro che una boccia di iniezione con dei riscaldatori elettrici avvolti all'esterno.

Anche in questo caso esistono diverse versioni che variano a seconda della tipologia di plastica da stampare, se bisogna prevedere la possibilità di effettuare dei cambi colore, ecc.

Le differenze tra le varie versioni sono dovute:

- o Alla forma del canale di iniezione nella zona del gate. Questa scelta dipende fortemente dal tipo di materiale che si deve stampare, in particolare alla sua semplicità con cui si degrada.
- o Alla forma esterna dell'ugello, sempre nella zona del gate. È molto importante perché in alcuni casi bisogna prevedere la camera di fusione. Inoltre le superfici di contatto tra ugello e piastre dello stampo sono molto importanti in quanto da esse dipende la trasmissione di calore tra le due parti, e ciò regola la temperatura del gate. Quest'ultima è un parametro fondamentale in quanto regola il tempo ciclo e la qualità del pezzo stampato.

- Al modo con cui il punto di iniezione è fissato al resto dell'ugello. Questa scelta è legata per lo più ad una questione di manutenzione, infatti risulta più semplice dover cambiare solo una parte dell'ugello, quella del gate che è soggetta alle sollecitazioni maggiori, piuttosto che cambiare tutto l'ugello.

Il problema di questa tipologia di ugello è che la differenza di temperatura tra il gate e la parte restante può essere troppo elevata e quindi si potrebbe avere una sigillatura del punto di iniezione troppo anticipata, con il rischio di avere delle perdite di carico troppo elevate e quindi di non riuscire a riempire il pezzo. Inoltre lasciano un segno sulla superficie, detto *testimone*, che è molto evidente e quindi non sempre è accettabile.

- Ugelli Torpedo: questa tipologia di ugelli è stata sviluppata proprio per risolvere tutte le problematiche degli ugelli completamente aperti. In pratica all'interno del canale di iniezione dell'ugello, al centro, viene ricavato uno spillo la cui punta arriva fino al gate, e per ridurre il più possibile le perdite di carico gli viene data una forma di siluro (per questo vengono detti torpedo). Il principio di funzionamento è il seguente: il busto della punta arriva fin dentro la parte del canale di iniezione che viene riscaldata dai riscaldatori e dove quindi si trova il fuso alla temperatura più alta. Il fuso trasmette una parte del proprio calore al busto della punta, che per conduzione lo trasmette a tutto il torpedo fino alla punta stessa. In questo modo, tramite la punta, si riesce a controllare la temperatura dell'area del gate e quindi ad evitare i problemi che si avevano negli ugelli completamente aperti. Regolando la posizione della punta rispetto al gate si regola la temperatura della zona e le dimensioni e la forma del testimone.

L'ugello rappresentato in figura 3.12 è un ugello aperto con punta. La parte 1 è la resistenza elettrica che avvolge il canale di alimentazione; la parte 2 è la punta, che presenta un foro dal quale fuoriesce il fuso polimerico; la parte 3 non è altro che una camicia d'aria che funge da isolante, in modo da limitare la dispersione di calore; mentre la parte 4 è la flangia per fissare l'ugello al manifold.

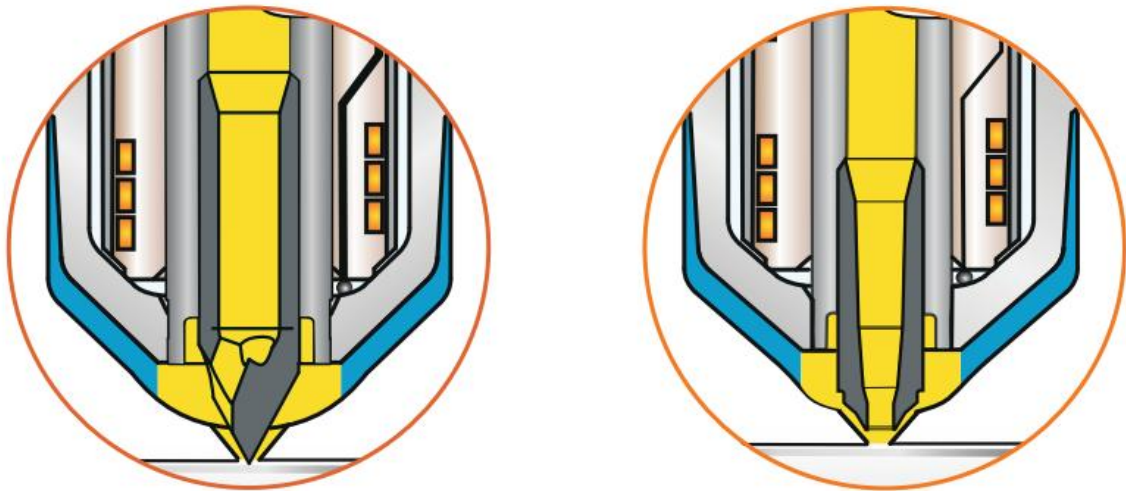


Fig. 3.13: Differenza tra un ugello completamente aperto (a destra) e uno torpedo (a sinistra). Le zone gialle sono quelle in cui scorre il materiale plastico fuso. [Immagine presa da catalogo Guenther]

- Ugelli Multipli: diversi articoli realizzati tramite stampaggio ad iniezione hanno ingombri molto piccoli, come ad esempio: tappi per bottiglie, componenti di penne, siringhe, ecc. In questi casi si cerca sempre di minimizzare le distanze tra le impronte in modo da ridurre il consumo di metallo e soprattutto, quando si hanno stampi multi cavità, per cercare di minimizzare le dimensioni dello stampo così da poterlo montare su presse di tonnellaggio minore.

Il problema è che gli ugelli tradizionali hanno delle dimensioni tali per cui non si riescono ad ottenere delle distanze tra gate pari alle distanze che si riescono ad ottenere tra i punti di iniezione delle cavità.

Gli ugelli multipli permettono di risolvere questo problema, in quanto in un unico blocco si hanno più punti di iniezione, e perciò si riescono ad avere dei gate molto vicini tra loro.

In base alle esigenze di cui si aveva bisogno, nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tipologie di ugelli multi-gate che possono essere riassunte nelle seguenti categorie:

- Ugelli multi-gate verticali: l'asse delle punte termo-conduttive è parallelo rispetto all'asse del canale di iniezione (Fig. 3.14);
- Ugelli multi-gate orizzontali: le punte formano un angolo di 90° rispetto all'asse del canale di iniezione;
- Ugelli multi-gate obliqui;

- Ugelli multi-gate edge: non hanno le punte termo-conduttive, ma hanno un gate con una forma tale per cui la pallina di plastica solidificata che lo ha sigillato viene, nel ciclo successivo, iniettata all'interno della cavità insieme alla plastica fusa. Ciò causa un difetto sulla superficie del pezzo detto *coda di cometa*, che a seconda del tipo di plastica può essere più o meno visibile. Anche se questo ugello presenta questo problema viene comunque preso in considerazione nella fase di progettazione del sistema in quanto sono molto più semplici e meno costosi rispetto agli ugelli multi-gate con punte.



Fig. 3.14: Ugello multi-gate, in pratica in un unico corpo si hanno più punti di iniezione. In questo modo si riescono a diminuire di molto le distanze tra un gate ed un altro e quindi si ha una maggiore densità delle impronte. [Immagine presa da sito iHR]

Nonostante esistono diversi modelli la struttura dell'ugello è più o meno simile per tutti. Si trattano di blocchi con un unico collegamento al manifold e con il canale di alimentazione dell'ugello che può terminare o in una camera che va a servire i vari gate, oppure si dirama in un numero di canali pari ai punti di iniezione che possiede. Ciascun punto di iniezione è provvisto di punte termo-conduttive, mentre la camera di fusione è facoltativa: dipende dalla temperatura che si vuole avere nella zona del punto di iniezione.

Anche se risolvono i problemi legati all'ingombro, gli ugelli multipli introducono una serie di problematiche che ne hanno rallentato lo sviluppo e l'utilizzo.

Innanzitutto devono essere realizzati con delle tolleranze molto strette e quindi con delle lavorazioni molto precise, in quanto piccole differenze dimensionali tra i gate potrebbero provocare uno sbilanciamento dell'iniezione. Un'altra questione che potrebbe causare dei problemi al bilanciamento è quella delle dilatazioni termiche che determina il numero massimo di gate che un solo ugello può avere. Gli ugelli multipli che hanno la camera di distribuzione del fuso, generano degli sforzi molto elevati, che devono per forza essere considerati per non generare problemi ancora più gravi e inoltre, siccome presentano diversi punti morti, sono poco adatti per lo stampaggio di pezzi che necessitano di cambio colore.

3.3.5.2 Ugelli con Valvola

Come si è visto dal capitolo precedente, gli ugelli aperti presentano una lunga serie di problematiche che a volte annullano i vantaggi dell'utilizzo di una camera calda. Tra questi quelli più determinanti sono: il tempo di sigillatura del gate incerto, il rischio che il sigillo (la pallina di plastica) non venga via con il pezzo e che quindi venga iniettata nella cavità insieme alla plastica, la possibilità che il gate non si sigilli per niente ed infine il testimone lasciato dal punto di iniezione che non sempre è accettabile.

Tutti questi problemi possono essere risolti con gli ugelli con valvola. In pratica, come mostrato in figura 3.15, non sono altro che degli ugelli a canale caldo tradizionali, quindi realizzati tramite una boccia opportunamente sagomata con dei riscaldatori esterni, solo che l'apertura del punto di iniezione dell'ugello viene regolata tramite uno spillo inserito all'interno del canale di iniezione dell'ugello e comandato tramite degli attuatori posti posteriormente al manifold.

Tramite lo spillo è possibile andare a sigillare completamente il gate appena completata l'iniezione della cavità, per cui non bisogna attendere che la plastica che si trova nel punto di iniezione solidifichi, andando così a ridurre il tempo di solidificazione; inoltre la chiusura anticipata del gate permette di iniziare prima la fase di plastificazione. Questi due risultati combinati tra loro permettono di ridurre sensibilmente il tempo ciclo. Per quanto riguarda il testimone, questo si riduce notevolmente, diventando quasi impercettibile in certi casi. Il segno che rimane è l'impronta dello spillo.

Inoltre, dato che non bisogna più attendere la sigillatura del gate, si possono adottare diametri del punto di iniezione molto più grandi, il che si traduce in:

- 1) Minore perdita di carico al punto di iniezione;
- 2) Minore dissipazione di energia;
- 3) Riduzione dello stress a cui il materiale viene sottoposto al gate.

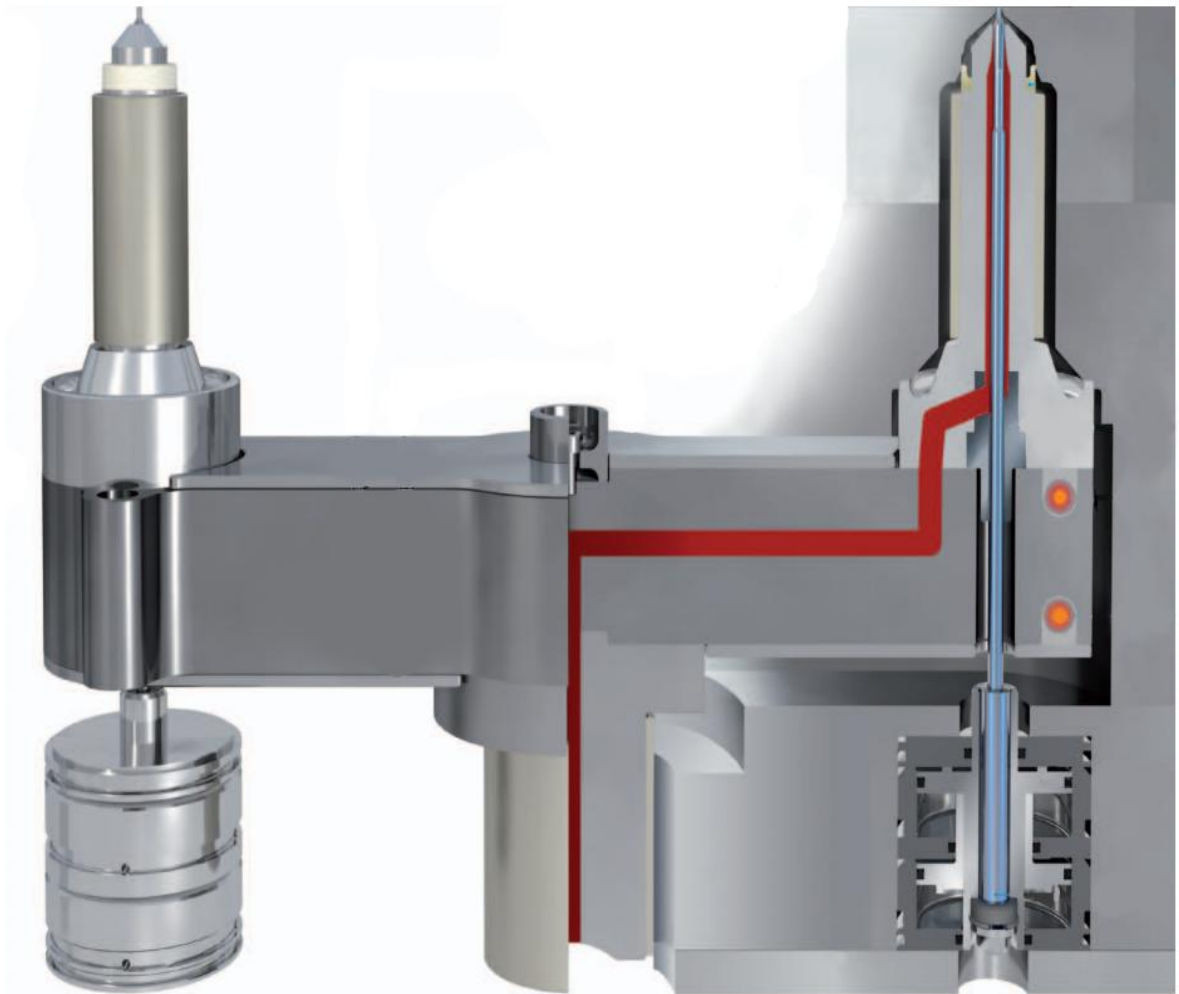


Fig. 3.15: Ugello con otturatore. In questo caso lo spillo (evidenziato in azzurro) viene movimentato da un attuatore idraulico. [Immagine presa da catalogo Maenner]

L'introduzione degli ugelli con valvola a spillo non ha solo introdotto questi vantaggi, ma ha anche dato la possibilità di realizzare nuove tecnologie di stampaggio, come:

- Stampaggio sequenziale;
- Stampaggio a sandwich;
- Stampaggio con agenti espandenti;
- Stampaggio in tandem;
- Stampi impilati.

Il problema di questa tipologia di ugelli è che incrementano notevolmente il costo della camera calda a causa della maggior complessità nella progettazione e costruzione. Nella progettazione la complessità è dovuta al fatto di dover introdurre il sistema di attuazione dello spillo, scegliere il tipo di attuatore, scegliere il design della punta dello spillo e dimensionare correttamente la sede dello spillo nell'ugello. Per quanto riguarda la costruzione, si devono effettuare lavorazioni aggiuntive e, come per tutti gli ugelli, le lavorazioni devono essere eseguite con un elevato grado di precisione.

4. Sistemi di attuazione dello spillo

I primi ugelli provvisti di otturatore (ossia di valvola a spillo) fecero la loro prima comparsa agli inizi degli anni '70. Fin da subito l'otturatore veniva comandato tramite attuatori oleodinamici o pneumatici, anche se inizialmente si provò a sviluppare anche un sistema completamente meccanico, ispirato agli iniettori dei motori diesel. Solo agli inizi degli anni 2000 alcune aziende incominciarono a sviluppare dei sistemi di attuazione dell'otturatore totalmente elettrici.

L'oggetto di questa tesi è proprio quello di capire quali sono i vantaggi e gli svantaggi dell'utilizzo di questi sistemi rispetto a quelli tradizionali, cercare il tipo di attuatore elettrico migliore tra quelli disponibili nel mercato ed infine realizzare un prototipo per verificare quali possono essere le prestazioni di questi sistemi.

Per poter confrontare i vari sistemi si procede con una breve descrizione delle tipologie di attuazione utilizzate negli anni.

4.1 Sistema di otturazione automatico

Il principio su cui si basano questi sistemi è ispirato a quello degli iniettori dei motori diesel, dove l'apertura della valvola è generata dalla pressione del fluido.

Negli ugelli, per far sì che ciò avvenga, la punta dello spillo viene rastremata tramite una riduzione della sezione ed un ampio raggio di raccordo.

In questo modo si viene a creare una superficie sulla quale il fuso polimerico va a spingere, generando una forza che tende ad aprire l'ugello. Questa forza viene contrastata da una molla che spinge l'otturatore in direzione contraria, in modo da mantenere chiuso l'ugello.

Durante la fase di iniezione, quando la vite spinge il materiale, la pressione del fuso aumenta. Ad un certo punto, la pressione raggiunge un valore tale per cui la forza che tende ad aprire l'otturatore sarà maggiore di quella generata dalla molla, e quindi l'ugello si apre. Quando poi la pressione ritorna a diminuire, terminata l'iniezione, la molla spinge l'otturatore andando così a chiudere l'ugello.

Si tratta di un sistema che opera in modo completamente automatico, senza il bisogno di dover avere manodopera specializzata per l'attrezzaggio dello stampo nella pressa e senza dover aggiungere apparecchiature ausiliari.

Tuttavia le problematiche che si devono affrontare non ne consentono l'utilizzo. Prima di tutto si avrebbe un'iniezione del fuso nella cavità troppo veloce, di tipo esplosiva, e ciò non permetterebbe di avere un flusso laminare, inoltre al gate si avrebbe una generazione troppo elevata di calore che causerebbe bruciature e degradazione del materiale. Solo questo problema basterebbe per impedire l'applicazione di questi sistemi, in quanto non permettono di ottenere parti di qualità. A questo si va ad aggiungere il problema di dover garantire il bilanciamento, e quindi la necessità di poter regolare il precarico delle molle e far sì che sia uguale per ciascun otturatore.

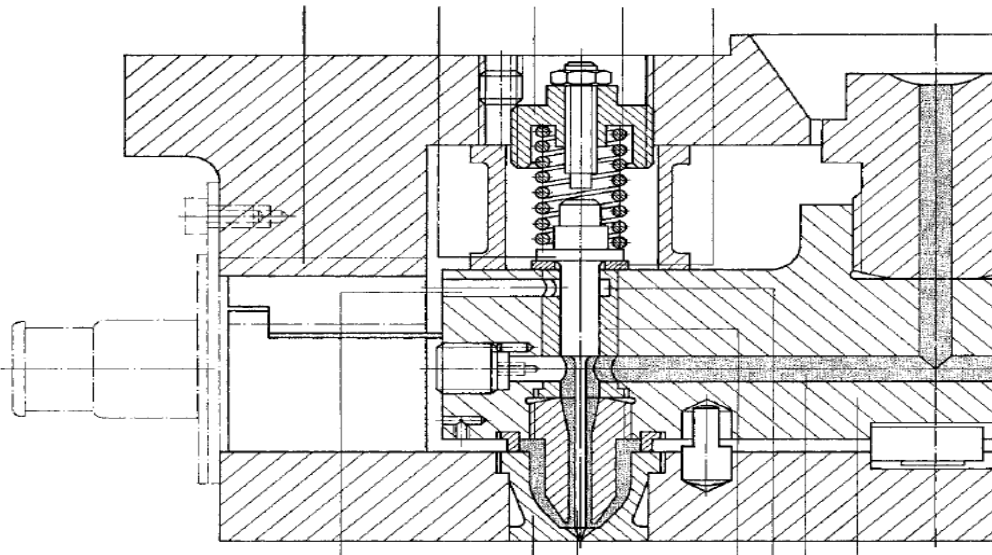


Fig. 4.1: Vista di un ugello con otturatore automatico.

4.2 Sistema di otturazione oleodinamico e pneumatico

Si trattano in assoluto dei sistemi di otturazione più utilizzati in quanto permettono di soddisfare diverse esigenze, come:

1. L'affidabilità. Si tratta di uno dei requisiti più importanti per le camere calde in quanto, a causa del loro costo elevato, degli alti volumi di produzione che devono realizzare e la

loro complessità nell'effettuare la manutenzione, devono poter garantire un periodo di lavoro, senza dare problemi, sufficientemente lungo.

2. Il controllo. Tramite l'utilizzo di valvole è possibile controllare l'apertura e chiusura dell'otturatore. Regolando invece la pressione del fluido si possono variare la forza dell'otturatore. La pressione minima del fluido viene calcolata basandosi sul principio del torchio idraulico, per cui la spinta del fluido sul pistone deve essere maggiore della spinta del fuso sulla superficie trasversale dello spillo. Inoltre tramite dei sistemi di regolazione presente tra il pistone e lo stelo è possibile regolare con molta precisione la posizione di chiusura dell'otturatore.
3. Semplicità. Questi attuatori non sono altro che dei cilindri e dato che sono la tecnologia più utilizzata, le aziende che li realizzano hanno definito degli standard e redatto dei cataloghi. Ciò ha permesso di ridurre i costi e migliorare la qualità dei prodotti. Inoltre, dato che il moto che generano è già di tipo lineare, possono essere direttamente collegati con lo spillo, senza interporre altri meccanismi.



Fig. 4.2: Camera calda con otturatori attuati tramite cilindri oleodinamici, fissati direttamente sul manifold. [Immagine presa da sito iHR]

Nei casi in cui la pressione di iniezione del materiale sia molto elevata, per non dover installare dei cilindri molto grandi o avere pressioni del fluido molto elevate, si possono utilizzare dei meccanismi che permettono di moltiplicare la forza dell'attuatore senza incrementare la pressione. Altre volte questi sistemi permettono di portare fuori dallo stampo gli attuatori, in modo che non risentano degli effetti legati alle alte temperature a cui si trova il manifold.

4.3 Sistema di otturazione elettrico

Il primo brevetto relativo ad un sistema di otturazione comandato tramite un attuttore elettrico risale al 2005. Come mostrato dalla figura 4.3, si tratta di un *elettromagnete* ed effettivamente, basandosi sull'esperienza passata, è il primo attuttore che ad un progettista può venire in mente di utilizzare in quanto l'otturatore si muove linearmente, nella direzione dell'asse longitudinale dello spillo.

Fino a quando si utilizzano i cilindri oleodinamici o pneumatici non si ha il problema del tipo e della direzione del moto, con gli attuatori elettrici invece, come vedremo più avanti, sì.

Di questo sistema, che utilizza un solenoide, non si conoscono casi di applicazione industriale, a differenza invece dei sistemi costituiti dall'insieme: motore elettrico-riduttore-riduttore vite/madrevite.

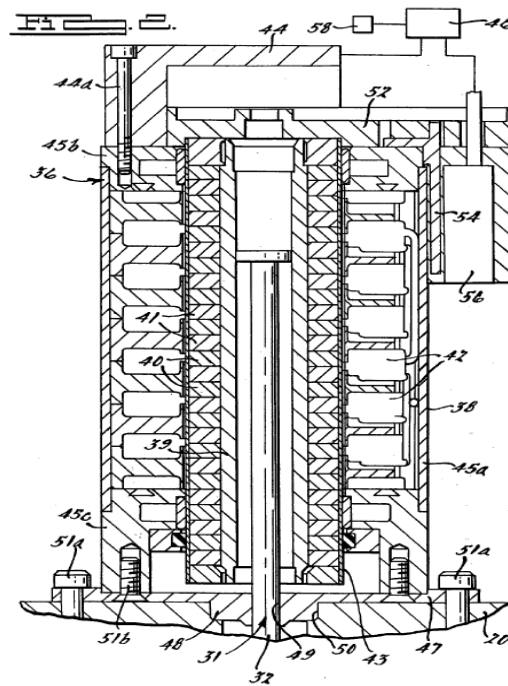


Fig. 4.3: Disegno della bobina brevettata per muovere lo spillo dell'otturatore.

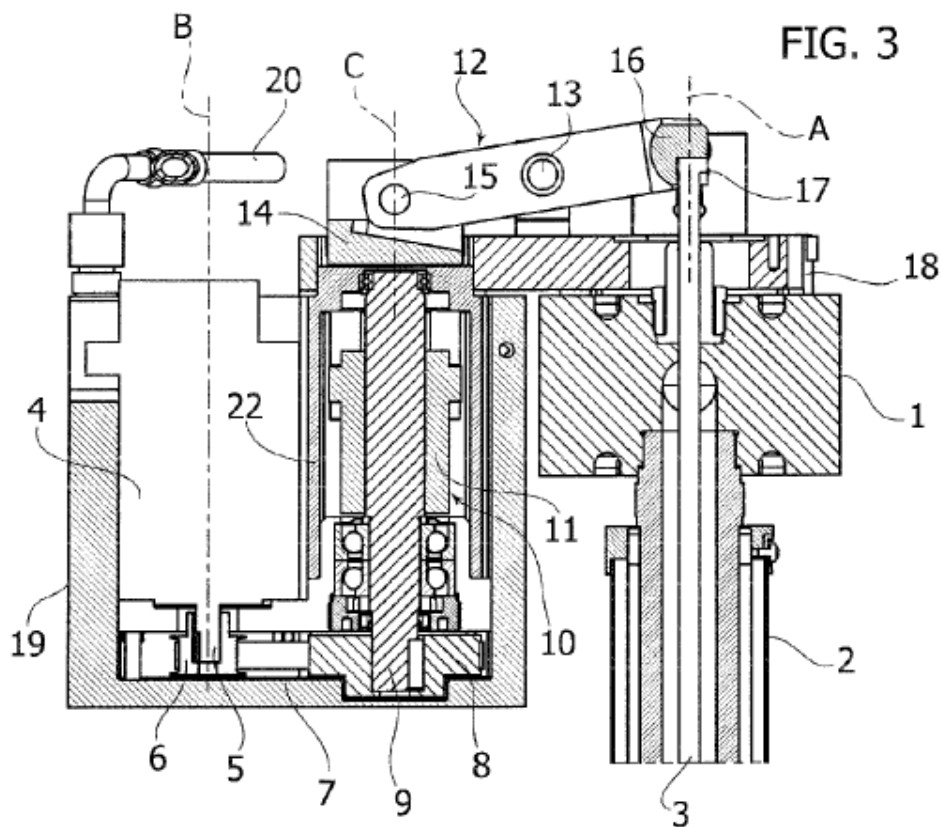


Fig. 4.4: Vista in sezione di un attuatore elettrico per lo spillo dell'otturatore. La parte 4 è il motore elettrico, collegato alla vite tramite una trasmissione a cinghia (7). In questo progetto è la madrevite (11) che trasla.

Nei prossimi due capitoli verranno brevemente descritti gli attuatori elettrici e i meccanismi che permettono di convertire il moto rotatorio dei motori elettrici in moto lineare.

4.3.1 Elettromagnete

In teoria con il termine *attuatore elettromagnetico* si indica tutta la classe di attuatori il cui funzionamento si basa sulle leggi dell'elettromagnetismo. Tuttavia l'industria utilizza questo termine per indicare una tipologia di prodotto che chiameremo *attuatore elettromagnetico a solenoide*, per distinguerlo dal termine utilizzato per indicare l'intera classe. A sua volta questa categoria di attuatori si divide in altre due tipologie che saranno indicate con i seguenti termini:

- Elettromagnete a solenoide;
- Voice Coil Actuator (VCA).

4.3.1.1 Elettromagnete a solenoide

Si tratta di un attuatore elettrico costituito da una bobina di rame (1) dove al centro viene inserito uno stelo (2), realizzato in materiale ferromagnetico, che è libero di muoversi lungo la direzione dell'asse longitudinale della bobina.

La bobina a sua volta viene inserita all'interno di un cilindro (3), o di una carcassa di forma qualsiasi, basta che sia in materiale ferromagnetico. La carcassa viene chiusa alle estremità tramite due fondelli:

- Il fondello anteriore (4), che è provvisto del foro per far uscire lo stelo;
- Il fondello posteriore (5), detto anche fondello di attrazione.

All'interno si può inserire delle molle o dei magneti permanenti, in modo da fissare la posizione di riposo dell'attuatore oppure per far sì che la posizione raggiunta dallo stelo permanga anche senza l'applicazione di corrente alla bobina.

Il principio di funzionamento è il seguente: ai capi della bobina viene applicata una differenza di potenziale costante nel tempo, per cui il filo di rame che forma la bobina viene attraversato da una corrente continua, generando un campo magnetico che la avvolge.

Se si inserisce lo stelo all'interno della bobina, senza carcassa e fondelli, si ha che lo stelo viene attirato fino al nucleo della bobina, e rimane fermo in quella posizione. Inoltre la forza di attrazione non sarebbe molto alta, in quanto il campo magnetico si disperderebbe nell'ambiente circostante.

La presenza della carcassa e dei fondelli consentono di non disperdere il campo, concentrandolo intorno alla bobina e allo stelo e quindi si aumenta l'intensità della forza di attrazione.

Oltre a ciò, il campo magnetico magnetizza tutte le parti realizzate in metallo ferromagnetico, anche il fondello posteriore, il quale attira a sé lo stelo, fino ad arrivare a battuta e mantenendolo attratto a sé per tutto il tempo in cui il campo magnetico della bobina persiste.

In questo modo si ottiene un attuatore che produce in uscita un movimento lineare.

Il ritorno alla posizione iniziale può essere effettuato con delle molle che riportano lo stelo alla posizione iniziale dopo aver tolto la potenza elettrica alla bobina, oppure utilizzando dei magneti permanenti. In questo caso lo scopo del campo magnetico generato dalla bobina è quello di inibire il campo del magnete permanente affinché lo stelo diventi libero di muoversi.

Il controllo degli elettromagneti può essere effettuato molto semplicemente tramite un reostato, andando a regolare la differenza di potenziale ai capi della bobina, oppure tramite l'ausilio di circuiti elettronici adottando la tecnica PWM.

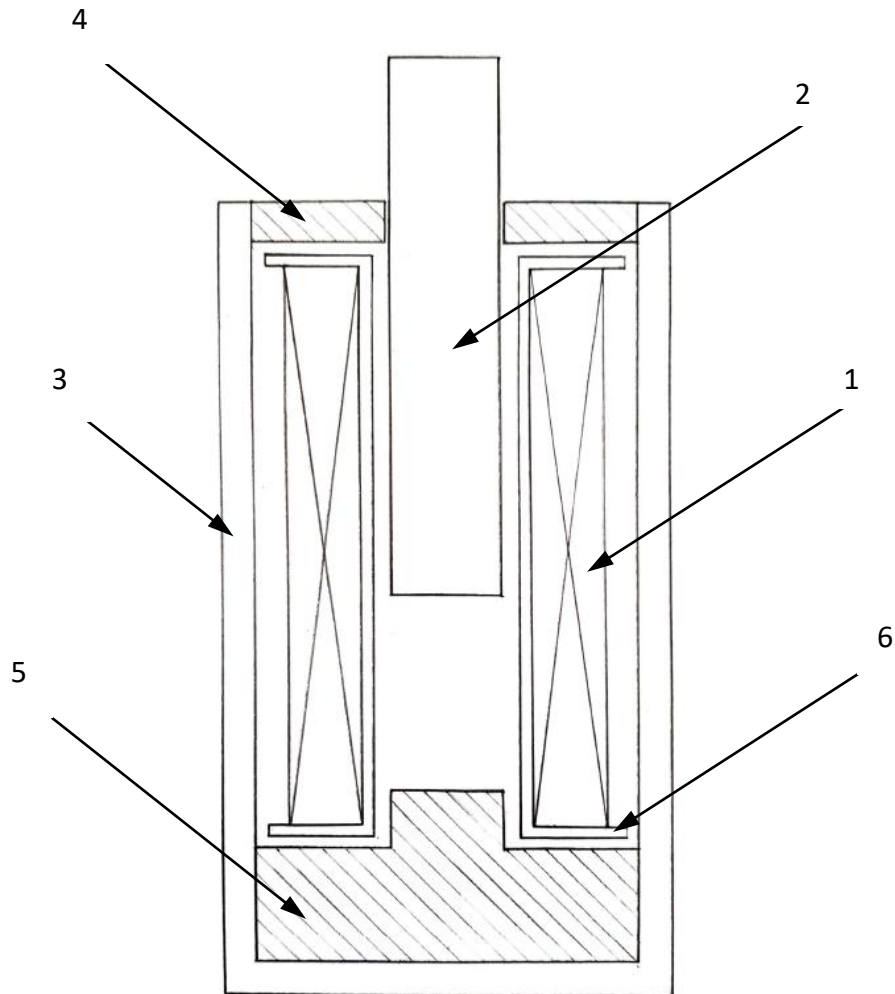


Fig. 4.5: Schema di un elettromagnete a solenoide. 1-Bobina; 2-Stelo; 3-Carcassa; 4-Fondello anteriore; 5- Fondello posteriore; 6-Rocchetto.

4.3.1.2 Voice Coil Actuator

Non sono altro che degli elettromagneti a cui vengono aggiunti dei magneti permanenti. I VCA sono gli attuatori che vengono utilizzati per muovere le membrane delle casse, solo che negli ultimi anni, grazie all'ausilio dell'elettronica, hanno avuto un forte sviluppo.

I VCA sono costituiti da uno stelo di materiale ferromagnetico che viene in parte avvolto da una bobina di rame. Intorno allo stelo, fissati sulla superficie interna della carcassa, vengono posizionati dei magneti permanenti.

Quando la bobina viene eccitata interagisce con lo stelo, formando un elettromagnete. Il campo magnetico interagisce con quello dei magneti permanenti, per cui in base alla direzione della corrente e dell'intensità della potenza, lo stelo si muove.

Rispetto agli elettromagneti permettono di avere un maggior controllo della posizione dello stelo, e forniscono una maggiore forza a parità di dimensioni.

4.3.1.3 Aspetti negativi

Anche se per certi aspetti sono differenti, elettromagneti e VCA si basano sullo stesso principio e per funzionare hanno bisogno di parti realizzate in materiale ferromagnetico e di una bobina in rame.

Quindi per poter realizzare un elettromagnete, indipendentemente dal tipo, si ha bisogno di conoscere:

- 1) La forza che si vuole avere allo stelo;
- 2) La corsa che deve effettuare;
- 3) Il ciclo di lavoro, ossia se l'elettromagnete deve lavorare in eccitazione continua, intermittente o in intermittenza continua;
- 4) La temperatura dell'ambiente di lavoro.

L'ipotesi di utilizzare un elettromagnete per muovere l'otturatore è stata fin da subito scartata in quanto andando a specificare i vari requisiti si è ottenuto che per soddisfare le richieste bisognerebbe realizzare un elettromagnete di dimensioni tali da rendere impossibile il montaggio in un sistema a camera calda, che successivamente andrebbe poi montato all'interno di uno stampo.

Ciò è dovuto al fatto che per generare delle forze e delle corse paragonabili agli attuatori idraulici e pneumatici disponibili in commercio bisognerebbe avere un numero di spire molto elevato, in quanto la potenza elettrica fornita alla bobina, per le norme di sicurezza, non può superare dei valori limite. Di conseguenza le dimensioni dell'otturatore diventerebbero troppo ingombranti.

Inoltre il ciclo di lavoro è tale per cui la temperatura dell'elettromagnete, generata dalle dissipazioni del campo magnetico, aumenterebbero di continuo nel tempo, andando a sommarsi alle già elevate temperature dell'ambiente di lavoro.

L'aumento di temperatura causa un calo del rendimento dell'attuatore che può essere compensato solamente andando a sovradimensionare l'elettromagnete rispetto a quella che è la potenza richiesta.

4.3.2 Motore elettrico

I motori elettrici rappresentano la tipologia di attuatori elettrici più diffusa ed utilizzata, basti pensare che nel 2017 la produzione globale è stata di 39,8 milioni di unità. I primi esperimenti riguardanti l'utilizzo di campi elettromagnetici per spostare degli oggetti risalgono alla metà dell'800, ma il primo vero motore elettrico utilizzato per scopi industriali e prodotto su scala commerciale risale al 1892. Da allora sono state sviluppate diverse tipologie di motori e ad oggi risulta addirittura difficile realizzare una classificazione esaustiva senza renderla lunga e complessa.

Perciò si evita di andare a descrivere il principio che sta alla base di ogni singola tipologia di motore elettrico ma si elencheranno, in modo sintetico, quelle che sono le più utilizzate oggi andando a confrontare le caratteristiche più importanti, fatta eccezione per il motore elettrico che alla fine è stato scelto per realizzare l'azionamento oggetto di questa tesi.

4.3.2.1 Principali tipologie e caratteristiche dei motori elettrici

In commercio sono ad oggi disponibili innumerevoli tipologie di motori elettrici, tuttavia quelle che sono più frequentemente utilizzate in ambito industriale sono:

- Motore Brushless DC;
- Motore Brushless AC;
- Motore Torque;
- Motore Lineare;
- Motore a Corrente Continua a collettore;
- Motore Asincrono con inverter;
- Motore Asincrono a controllo vettoriale;
- Motore Passo Passo.

Il problema di avere una così vasta gamma di scelta è che va a complicare notevolmente il processo di scelta del motore da parte del progettista, per questo motivo è necessario realizzare un elenco di caratteristiche che si possono utilizzare come termini di confronto tra le varie tipologie di motori.

Nelle seguenti tabelle vengono sinteticamente confrontate le varie tipologie di motori basandosi appunto su questi termini di confronto e anche in base alla capacità di andare a soddisfare le esigenze del progetto.

	Brushless DC	Brushless AC	Torque	C.C. a collettore
Regolazione	ottima	ottima	ottima	ottima
Inseguimento	buono	eccellente	ottimo	ottimo
Dinamica	buona	eccellente	buona	eccellente
Picchi di coppia	2-4	4-6	no	6
Picchi di velocità	no	no	no	no
Taglia	< 5 kW	< 10 kW	< 300 Nm	Da pochi W a qualche MW
Diffusione	Ampia, ma in diminuzione	ampia	Molto bassa	ampia
Costo	basso	Alto ma in diminuzione	Molto alto	basso
Possibilità di regolazione	Buona	Ottima	Ottima	Ottima
Predisposizione per applicazioni ad elevata dinamica	Buona	Ottima	Ottima	Ottima

Tab. 4.1: Confronto tra le varie tipologie di motori elettrici. [Tabella estratta dal libro “Meccanica degli azionamenti, Vol. 1 – Azionamenti elettrici]

	Lineare	Asincrono con inverter	Asincrono a controllo vettoriale	Passo passo
Regolazione	ottima	bassa	eccellente	Buona
Inseguimento	ottimo	scadente	eccellente	Buono
Dinamica	ottima	discreta	eccellente	Discreta

Picchi di coppia	2-4	2-3	4-6	No
Picchi di velocità	si	si	si	No
Taglia	< 20000N	0,5 kW – 1 MW	<500 kW	< 5 kW
Diffusione	Molto bassa ma in crescita	ampia	Modesta ma in crescita	Ampia per certe applicazioni
Costo	Molto alto	basso	elevato	basso
Possibilità di regolazione	Ottima	Scadente	Ottima	Buona
Predisposizione per applicazioni ad elevata dinamica	Ottima	Scarsa	Ottima	Buona

Tab. 4.2: Confronto tra le varie tipologie di motori elettrici. [Tabella estratta dal libro “Meccanica degli azionamenti, Vol. 1 – Azionamenti elettrici]

	Brushless DC	Brushless AC	Torque	C.C. a collettore	Lineare	Asincrono con inverter	Asincrono a controllo vettoriale	Passo passo
Variazione di velocità		X		X		X		X
Regolazione di velocità	X	X		X		X		
Regolazione di posizione ad asse singolo	X	X					X	X
Inseguimento di posizione ad asse singolo	X	X					X	X
Regolazione di posizione multiasse coordinato	X	X	X				X	X
Inseguimento di posizione multiasse sincronizzato	X	X					X	X

Tab. 4.3: Predisposizione delle differenti tipologie di azionamento elettrico per le esigenze di progetto. [Tabella estratta dal libro “Meccanica degli azionamenti, Vol. 1 – Azionamenti elettrici]

4.3.2.2 Motore Brushless AC

Il motore brushless, alimentato a corrente alternata, non è altro che una macchina sincrona a magneti permanenti, solo che a differenza dei motori sincroni sul rotore non si hanno più gli avvolgimenti di eccitazione ma vengono alloggiati dei magneti permanenti.

Il rotore e lo statore sono sempre realizzati in materiale ferromagnetico laminato e sullo statore vengono sempre collocati gli avvolgimenti, solo che sono distribuiti in modo tale da generare un campo sinusoidale.

Quando gli avvolgimenti vengono alimentati si genera allo statore un campo magnetico alternativo, che ruota ad una velocità proporzionale alla frequenza di alimentazione. Questo campo magnetico attira a sé i magneti del rotore, per cui inizia a ruotare, fino a quando non raggiunge la velocità del campo magnetico.

La coppia massima si ottiene quando il campo magnetico generato dalle fasi è ortogonale rispetto a quello dei magneti, per cui è necessario mantenere sempre sfasato il campo magnetico dello statore rispetto a quello del rotore, in modo da farlo ruotare. Per questo motivo la corrente degli avvolgimenti dello statore deve essere fatta commutare in funzione della posizione del rotore, e ciò è possibile solo grazie all'ausilio dell'elettronica. In pratica tutti i motori brushless AC sono provvisti di un sensore di posizione, che invia la posizione del rotore rispetto allo statore ad un microprocessore, che elabora il segnale e lo manda ad un inverter che commuta la corrente degli avvolgimenti in modo da far rimanere sfasato il campo magnetico. Tutto ciò permette anche di avere un elevato controllo della velocità e del posizionamento del rotore. Grazie all'utilizzo dell'inverter e dei magneti permanenti i motori brushless non hanno i collettori e le spazzole, per questo vengono chiamati con questo nome.

L'assenza delle spazzole permette di eliminare una serie di difetti che si avevano nei motori a corrente continua, come:

- La presenza di scintille nella zona di contatto tra spazzole e rotore;
- Dinamica meno performante a causa della presenza dell'attrito tra spazzola e rotore;
- Manutenzione periodica e frequente per la sostituzione delle parti soggette ad usura;
- Alti valori di inerzia.

Insomma, i motori brushless hanno delle prestazioni molto migliori rispetto agli altri motori per quanto riguarda dinamica e capacità di controllo, per questo motivo oggi vengono ampiamente utilizzati in settori come quelli della robotica, degli azionamenti, ecc.

D'altro canto questi motori hanno un costo più elevato dovuto per lo più alla presenza dei magneti permanenti (sono magneti speciali, in grado di generare un campo magnetico di elevata intensità) e dell'elettronica (il costo dell'inverter e dell'azionamento è circa pari al costo di un singolo motore).



Fig. 4.6: Motore elettrico brushless.

5. Il pistone elettrico

È con questo nome che l'azienda ha deciso di chiamare il meccanismo di otturazione attuato elettricamente. In questo capitolo verranno descritte le varie scelte e riportati i dati che hanno guidato al dimensionamento dei vari componenti.

5.1 Dati

Definire i dati di questo progetto non è stato semplice in quanto ogni oggetto di plastica realizzato mediante stampaggio ad iniezione rappresenta un caso unico, ciò significa che ha parametri di stampaggio e forme dello stampo che sono completamente diversi da altri oggetti.

I dati più importanti per dimensionare un otturatore sono:

- La pressione massima di iniezione che si raggiunge all'interno della cavità dello stampo;
- La corsa massima che lo stelo è in grado di coprire;
- Il tempo, o la velocità, di chiusura ed apertura dell'otturatore.
- Il diametro dello spillo.

La forza che il fuso polimerico in pressione genera sulle superfici interne della cavità è uguale in ogni punto, per cui la forza di compressione che va a scaricarsi sullo spillo è pari a:

$$F = p_{i,max} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (5.1.1)$$

Dove:

- $P_{i,max}$ è la pressione massima che si raggiunge durante la fase di iniezione;
- d è il diametro dell'otturatore.

Da questa formula sono emersi fin da subito due grandi problemi:

- 1) Definire un valore della pressione di iniezione massima per calcolare la forza sullo spillo in modo da progettare un otturatore universale, cioè che può essere utilizzato su camere calde per stampi di pezzi anche molto diversi fra loro, in grado di soddisfare gli altri requisiti, è molto

difficile. Infatti, come è stato detto prima, ogni oggetto da realizzare rappresenta un progetto unico, diverso da tutti gli altri. Il rischio è quello di assumere un valore della pressione di iniezione massima troppo elevato o troppo basso, e quindi di andare a realizzare un sistema o troppo ingombrante o sottodimensionato.

2) Tra la forza e il diametro dello spillo c'è una proporzionalità quadratica, ciò significa che a parità di pressione di iniezione, se si raddoppia il diametro la forza aumenta di quattro volte. Si tratta di un problema in quanto questi sistemi verrebbero utilizzati anche per stampare oggetti di grandi dimensioni, dove appunto si utilizzerebbe l'iniezione sequenziale, ma al tempo stesso si hanno bisogno di diametri dell'ugello molto grandi per far fluire più fuso possibile e per ridurre gli sforzi sul materiale.

Questi problemi dovranno essere considerati qualora si procedesse ad una commercializzazione del prodotto, in modo tale da avere una gamma di versioni.

Alla fine si è deciso di andare a consultare i cataloghi dei pistoni idraulici e pneumatici, disponibili in commercio, confrontando i dati con l'esperienza dei progettisti dell'ufficio tecnico, si è deciso che il pistone elettrico doveva essere in grado di generare una forza pari a 3000N.

Altri dati importanti che si hanno bisogno per costruire un otturatore sono i valori della corsa e della velocità. La corsa deve essere molto ampia, così da poter liberare il più possibile il punto di iniezione. Per questo si è scelto una corsa pari a 20mm, mentre la velocità viene definita dalla corsa e dal tempo con cui l'otturatore deve effettuare la chiusura. Utilizzando un attuatore elettrico è possibile controllare con molta precisione la velocità dello spillo, a differenza degli attuatori oleodinamici e pneumatici dove la velocità non è controllabile ed è molto elevata, basti pensare che la corsa viene effettuata in pochissimi decimi di secondo. Se da un lato questo permette una chiusura istantanea del punto di iniezione dall'altro genera degli sforzi sul materiale plastico che sono indesiderati, per questo si è scelto un tempo di chiusura dell'otturatore che sia compreso tra 0,2 e 1 secondo, il che significa che lo spillo deve avere una velocità media di almeno 30mm/s.

Altre considerazioni di cui tener conto sono:

- 1) Il meccanismo deve operare a temperature che vanno dai 100 ai 400 °C;
- 2) Si vuole un controllo molto preciso della velocità e della posizione dello spillo.

Nella tabella 5.1 vengono riepilogati tutti i dati da dover considerare nella progettazione del pistone elettrico.

Forza di chiusura	3000 N
Corsa massima	20 mm
Velocità media dell'otturatore	30 mm/s
Precisione del controllo	< 0,1 mm
Range temperatura di lavoro	100 – 400 °C

Tab. 5.1: Requisiti minimi richiesti all'attuatore, detto pistone elettrico.

5.2 Scelta dell'attuatore elettrico

Gli attuatori elettrici possono essere suddivisi in due tipologie: gli elettromagneti e i motori elettrici. Gli elettromagneti sono stati scartati fin dalle prime fasi in quanto non riescono a soddisfare un elevato numero di requisiti come:

- Resistenza alle alte temperature;
- Controllo preciso dello spillo;
- Compattezza.

In particolare quest'ultimo aspetto è stato quello più limitante in quanto per poter generare una forza così elevata, con un ciclo di lavoro intermittente continuo, si dovrebbe avere un elettromagnete molto grande e perciò diventerebbe impossibile montarlo in uno stampo. Quindi, al momento, gli elettromagneti non possono essere applicati e si è scelto di passare al motore elettrico.

A questo punto il problema è quale tipologia di motore scegliere. Inizialmente si è pensato di utilizzare un motore passo-passo, ed è stato costruito un prototipo in quanto alcune aziende concorrenti lo avevano utilizzato per sistemi simili. Ma questa idea è stata scartata fin da subito in quanto le coppie che questi motori sono in grado di erogare non si avvicinano minimamente a quelle di cui si ha effettivamente bisogno. Alla fine si è scelto di utilizzare un motore brushless AC in quanto, rispetto a tutte le altre tipologie di motori, risulta essere il migliore compromesso, infatti rimane compatto e al tempo stesso ha una caratteristica della coppia in grado di soddisfare i nostri requisiti. Inoltre ha un ottimo controllo. Il dimensionamento del motore verrà eseguito nel capitolo inerente al dimensionamento di tutto il sistema.

5.3 Scelta del meccanismo

Il problema del motore elettrico è che ci fornisce un moto di rotazione quando noi invece abbiamo bisogno di un moto lineare. Abbiamo quindi bisogno di un meccanismo che permetta di realizzare questa conversione.

I meccanismi più comunemente utilizzati sono:

- Vite/madrevite: si tratta di una vite con profilo trapezoidale, ma che può essere anche metrico, e di una madrevite. Uno dei due componenti è collegato al motore e ruota, l'altro invece viene vincolato in modo da impedirne la rotazione. In questo modo uno dei due componenti si avvita/svita e si ottiene un moto lineare.

Possono raggiungere dei valori di rendimento molto elevati, soprattutto nel modello più avanzato di questo sistema che è rappresentato dalla vite a ricircolo di sfere. Inoltre variando il numero di principi della vite e il passo è possibile aumentare o diminuire la velocità di traslazione, per cui si riescono ad ottenere delle velocità e delle forze di scorrimento molto elevate.

Si tratta del sistema che è stato scelto in quanto, rispetto agli altri meccanismi esposti di seguito, rimane il più compatto, permette di ottenere un'elevata velocità di scorrimento e al tempo stesso mantiene una forza di spinta piuttosto elevata senza il bisogno di grandi coppie. Inoltre rimane molto affidabile e permette un controllo della posizione e una personalizzazione della legge di moto molto buoni.



Fig. 5.1: Vite a profilo trapezoidale con madrevite. In questa immagine la madrevite ruota mentre la vite scorre su di essa in quanto la sua rotazione viene impedita. [Immagine presa da catalogo Thomson linear]

- Ginocchiera: è un meccanismo che, nella sua versione più semplice mostrata in figura 5.2, è costituito da una biella (3) e due aste (4) e (5). Un piede di biella è collegato ad una manovella (2), collegata con l'albero del motore elettrico che genera un momento (M). L'altro piede è vincolato a scorrere linearmente per mezzo di una guida e su di esso vengono fissate una delle due estremità delle due aste. Una estremità di un'asta è fissa mentre l'altra è vincolata a scorrere linearmente (6).

Tramite una ginocchiera non solo si ottiene una conversione da moto rotatorio a lineare ma si ottiene anche una moltiplicazione molto elevata della forza, rispetto alla coppia del motore. Tuttavia si tratta di un sistema molto ingombrante, complesso da realizzare e che potrebbe dare problemi di affidabilità a causa di tutti i nodi presenti.

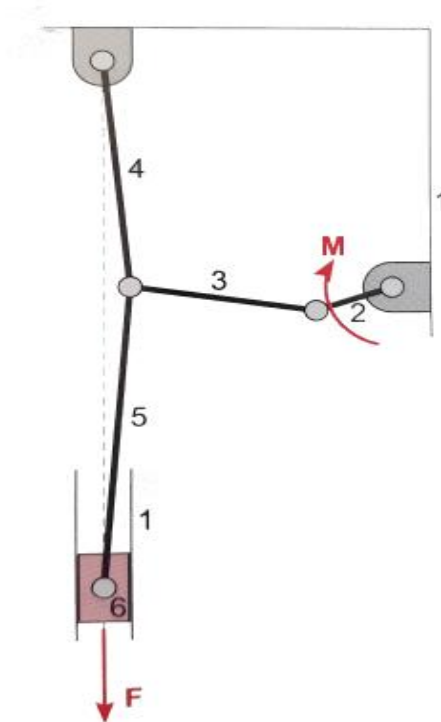


Fig. 5.2: Schema di un meccanismo di tipo ginocchiera. 1-Telaio; 2-Manovella; 3-Biella; 4-Asta; 5-Asta; 6-Guida.

- Camme: si tratta di un elemento, con un profilo sagomato, che viene montato direttamente sull'albero del motore. Sulla superficie del profilo si trova appoggiata un'asta che trasla seguendo il profilo della camma, quindi la velocità e la posizione dell'asta dipendono dal profilo e dalla velocità della camma, che però in genere è costante. L'asta viene tenuta in contatto continuo con la camma o tramite l'utilizzo di molle oppure con un'altra camma.

Questo sistema è stato scartato in quanto la camma viene realizzata in modo da ottenere una legge di moto ben definita che non può essere variata a piacere, inoltre la forza che si avrebbe allo spillo non sarebbe costante e si avrebbe bisogno di un motore con una coppia molto elevata.

- Cremagliera: si tratta di un meccanismo costituito da una ruota dentata, che viene calettata all'albero del motore ed ingrana sulla dentiera, la quale è libera di traslare, mentre il motore con la ruota dentata sono fissi. In questo modo si è ottenuto un moto lineare da uno di rotazione, il problema è che la forza che è in grado di generare dipende dal diametro del pignone, per cui se si vuole un sistema compatto si ha bisogno di un motore molto grande, se si vuole risparmiare sul motore si ha bisogno di un diametro della ruota dentata maggiore, quindi in entrambi i casi si avrebbero problemi di ingombro.



Fig. 5.3: Immagine di una cremagliera. Ipotizzando che la coppia sia applicata al pignone, e che sia fissato, la dentiera al di sotto trasla.

- Cinghie: il principio è molto simile a quello della cremagliera, solo che invece di una dentiera si ha appunto una cinghia e quindi c'è anche bisogno di una puleggia. Alla cinghia viene attaccato un carrello, per cui quando il motore ruota fa scorrere la cinghia ed il carrello si muove linearmente. Anche in questo caso si ha il problema dell'ingombro a cui si aggiunge anche quello dell'affidabilità.

5.4 Dimensionamento del pistone elettrico

Dopo aver definito i componenti per realizzare il pistone elettrico si è passati al loro dimensionamento e dislocazione. Queste operazioni sono state effettuate insieme ai progettisti dell'ufficio tecnico e in un'ottica di realizzare un prototipo funzionale con il quale effettuare dei test e incominciare ad acquisire esperienze riguardo a questi dispositivi, in sostanza si è favorito un approccio pragmatico piuttosto che teorico/ingegneristico.

Innanzitutto viene dimensionato il meccanismo vite/madrevite. A tal proposito in questa prima fase del progetto si è scelto di realizzare un filetto a profilo metrico invece che trapezoidale in quanto è più semplice da realizzare e riparare qualora ci fossero dei malfunzionamenti.

Il materiale con cui la vite viene realizzata è Bronzo B14, adatto appunto per meccanismi soggetti ad attrito. Alla fine si è deciso di utilizzare una vite M20, ad un unico principio e con un passo da 1,5mm.

Materiale	Bronzo UNI EN 1982 : CC483K – G CuSn 12 (B14)
Carico Rottura	270 ÷ 320 N/mm ²
Carico Snervamento	150 ÷ 170 N/mm ²
Allungamento	5 ÷ 10 %
Durezza HB	90 ÷ 100

Tab. 5.2: Caratteristiche del materiale con cui viene realizzata la vite.

Per sicurezza si esegue una verifica di resistenza a compressione della vite, con un coefficiente di sicurezza pari a 3,0. Le equazioni per il calcolo della tensione ammissibile e del diametro minimo della vite sono le seguenti:

$$\sigma_{ams} = \frac{\sigma_s}{X} \quad (5.4.1)$$

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4F_{max}}{\pi\sigma_{ams}}} \quad (5.4.2)$$

Si ottiene un diametro 8,46mm, quindi siamo abbondantemente in sicurezza, per cui la sezione della vite è verificata, mentre il rendimento diretto e retrogrado della vite viene determinato dalle seguenti equazioni:

$$\eta = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \phi)} \quad (5.4.3)$$

$$\eta' = \frac{\tan(\alpha - \phi)}{\tan \alpha} \quad (5.4.4)$$

Dove l'angolo dell'elica è di $1,44^\circ$, mentre quello di attrito è stato posto a $2,86^\circ$. Per cui si ottiene che il rendimento diretto è del 33,4%, mentre quello retrogrado risulta negativo, perciò la spinta sullo spillo non genera moto retrogrado e quindi non si ha bisogno di provvedere un freno sul motore.



Fig. 5.4: Foto della vite traslante del pistone elettrico, con spillo dell'otturatore montato.

L'obiettivo è quello di realizzare un pistone che sia compatto, in modo da poter andar bene anche per stampi di oggetti di piccole dimensioni, e soprattutto che sia in grado di resistere alle temperature a cui si trova l'ambiente in cui lavora. Da questo punto di vista il problema è rappresentato dal motore elettrico, infatti le dimensioni dei motori brushless sono simili a quelle del meccanismo vite/madrevite, quindi quando si va ad inserire il motore le dimensioni del pistone raddoppiano, ciò significa che se il motore viene montato in asse con la vite si avrebbe un sistema di otturazione molto lungo. Inoltre il valore limite della temperatura dell'ambiente di lavoro del motore ricade all'interno dell'intervallo di temperatura a cui in genere le camere calde si trovano.

Per risolvere questi problemi si è scelto di interporre tra il meccanismo vite/madrevite e il motore elettrico un riduttore ad assi sghembi, in questo modo l'asse del motore è ortogonale a quello della vite, permettendo così di ridurre lo spessore della camera calda ma soprattutto montando un albero più lungo è possibile portare il motore il più lontano possibile dal manifold e quindi dalla zona più calda del sistema a canale caldo.

Sempre nell'ottica di minimizzare le dimensioni si è scelto di realizzare la madrevite all'interno della ruota dentata che ingrana con il pignone, per cui la parte che trasla è la vite. In figura 5.4 si può osservare che una parte della vite è stata fresata in modo da impedire la rotazione della vite rispetto alla madrevite, ottenendo in questo modo solo traslazione. La parte fresata della vite scorre all'interno di un foro di sezione rettangolare, ottenuto tramite l'assemblaggio di due piastre.



Fig. 5.5: Foto della ruota dentata del riduttore ad asse sghembi con ruote elicoidali. Nel foro è stata realizzata la filettatura sulla quale la vite traslante si avvita/svita.

La ruota dentata e il pignone vengono supportati da due coppie di cuscinetti obliqui montati in una configurazione ad "O", in quanto oltre alla forza assiale dovuta allo spillo si ha anche una forza radiale dovuta al riduttore.

Per il riduttore non c'è bisogno di effettuare un dimensionamento in quanto le sue dimensioni vengono definite dal fatto che la ruota dentata deve contenere la vite traslante, per cui dovrà sottostare a dei valori minimi delle dimensioni, tuttavia si effettueranno dei calcoli di verifica dopo che saranno determinati i valori di coppia massima e del numero di giri massimo.

A questo punto la catena cinematica è completa e quindi è possibile calcolare la coppia e il numero di giri che il motore elettrico deve erogare per soddisfare le richieste dell'ufficio tecnico.

L'equazione per determinare la coppia necessaria per soddisfare i requisiti di forza e velocità è la seguente:

$$C = \frac{F \cdot p}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} + J \cdot \alpha \quad (5.4.5)$$

Dove:

- F è la forza che lo spillo deve essere in grado di spingere;
- p è il passo della vite;
- η è il rendimento diretto della vite;
- J è il momento d'inerzia di tutta la catena cinematica;
- α è l'accelerazione angolare massima della vite.

Dai dati che abbiamo, si ottiene che per far ruotare la vite è necessaria una coppia pari a: 2,2 Nm

Il momento d'inerzia e l'accelerazione angolare sono stati calcolati nel modo seguente:

- Il momento d'inerzia è dato dalla seguente equazione:

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (5.4.6)$$

Ed è uguale a $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Kgm}^2$

- Per determinare l'accelerazione angolare massima si è proceduto nel modo seguente: prima di tutto si è definita una legge di moto, ossia il tipo di curva che esprime l'andamento della corsa, della velocità e dell'accelerazione in funzione del tempo.

Dato che le corse che deve effettuare l'otturatore sono due si è scelto di utilizzare per la corsa di apertura una legge di moto cicloidale e per la corsa di chiusura una legge di moto ad accelerazione costante.

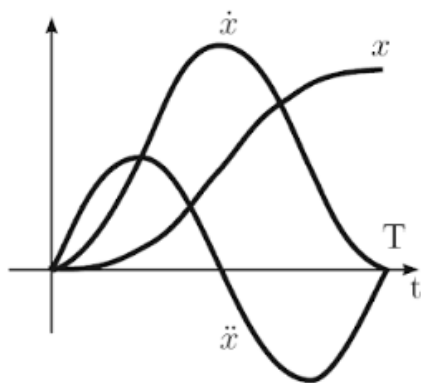
A questo punto, conoscendo i valori della corsa massima da effettuare e il tempo minimo con cui effettuarla, si possono ricavare i vari profili e quindi i valori massimi di velocità e accelerazione.

Legge di moto cicloidale

$$\dot{x} = \frac{\Delta s}{T^2} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (5.4.7)$$

$$\dot{x} = \frac{\Delta s}{T} \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right)\right) \quad (5.4.8)$$

$$x = \Delta s \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)\right) \quad (5.4.9)$$



Legge di moto ad accelerazione costante

$$V_{\max} = \frac{2\Delta s}{T_{\text{acc}} + T + T_{\text{dec}}} \quad (5.4.10)$$

$$A_{\max} = \frac{V_{\max}}{T_{\text{acc}}} \quad (5.4.11)$$

$$D_{\max} = \frac{V_{\max}}{T_{\text{dec}}} \quad (5.4.12)$$

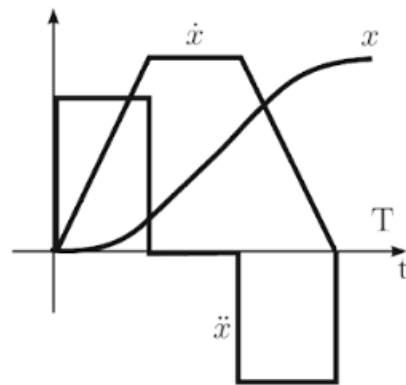


Fig. 5.6: Nell'immagine a sinistra si ha il grafico di una legge di moto cicloidale. x rappresenta lo spazio percorso, in funzione del tempo, mentre le sue derivate esprimono come varia la velocità e l'accelerazione, sempre in funzione del tempo. Nell'immagine a destra il grafico di una legge di moto ad accelerazione costante

Tra la corsa di apertura dello spillo e di chiusura quella che ci interessa maggiormente è quella di chiusura, in quanto viene applicato il carico, perciò effettueremo i calcoli basandoci solamente sulla legge di moto ad accelerazione costante.

La velocità massima che l'otturatore può raggiungere si può calcolare tramite la seguente equazione:

$$V_{\max} = \frac{2C_{\max}}{T_{\min}} \quad (5.4.13)$$

Dove C_{\max} è la corsa massima che lo spillo può fare, ed è pari a 20mm. T_{\min} invece è il tempo minimo in cui questa corsa può essere effettuata, ipotizzando una velocità media di 35mm/s, in modo da essere in sicurezza, si ha che il minor tempo di percorrenza è dato dalla seguente equazione:

$$T_{\min} = \frac{C_{\max}}{V_{\text{media}}} \quad (5.4.14)$$

Ed è pari a 0,6s, quindi la velocità massima è uguale a 66,7mm/s.

Lo spillo viene spinto in avanti dalla vite, che si muove di moto traslatorio. Per determinare la velocità di rotazione della madrevite si applica la seguente equazione:

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi V_{\max}}{p} \quad (5.4.15)$$

Dai calcoli si ha che la velocità di rotazione massima è pari a 279,3rad/s. Quindi l'accelerazione angolare massima, calcolata tramite la seguente espressione:

$$\alpha_{\max} = \pi \frac{\omega_{\max}}{T_{\min}} \quad (5.4.16)$$

È pari a: 1462,2rad/s².

Nel progetto si è scelto di utilizzare entrambe le leggi di moto per poter effettuare un confronto. Infatti la legge cicloidale permette di ottenere un andamento dell'accelerazione più dolce, il che significa un funzionamento del motore più regolare rispetto al caso della legge ad accelerazione costante dove si ipotizza che in un istante il motore raggiunga l'accelerazione massima. Tuttavia quest'ultima permette di ottenere delle accelerazioni e velocità massime molto più basse rispetto alla legge cicloidale, mentre i diagrammi di spostamento, come si può osservare dalla figura 5.6, sono molto simili.

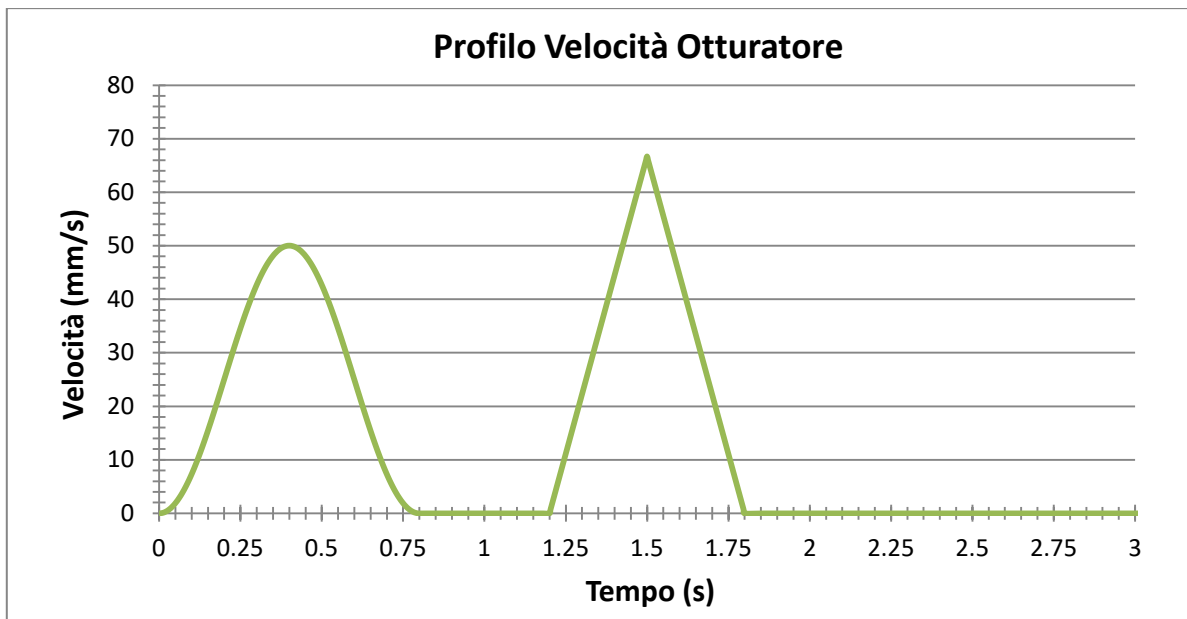


Fig. 5.7: Grafico del profilo di velocità utilizzato per calcolare i valori di velocità ed accelerazioni massimi.

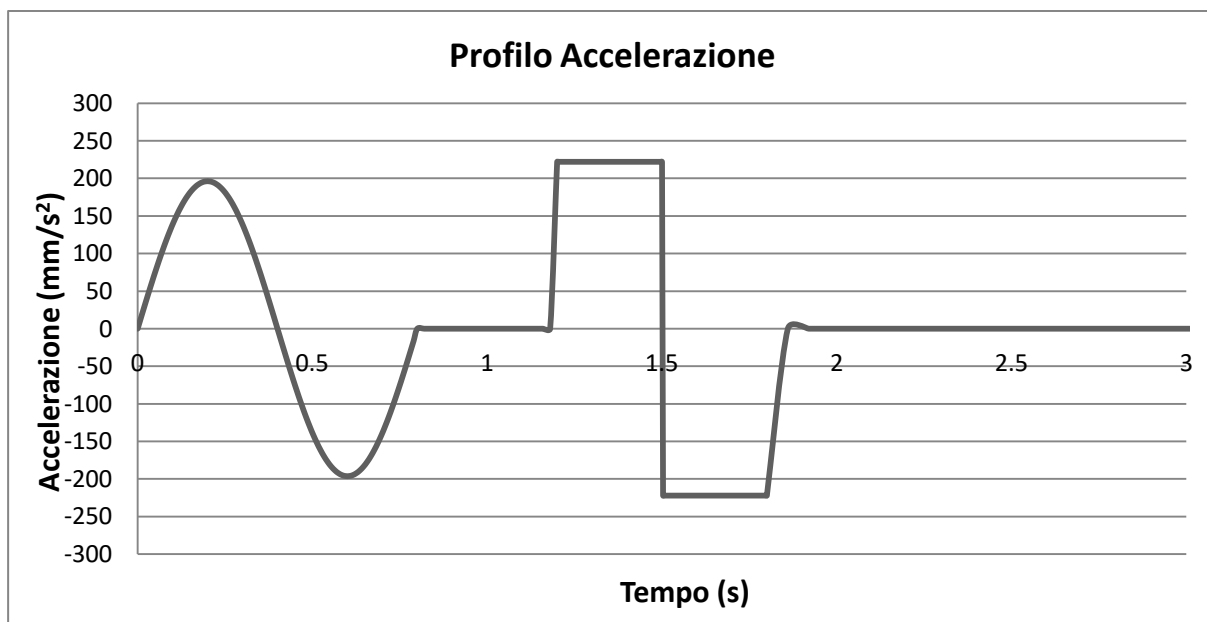


Fig. 5.8: Grafico del profilo di accelerazione.

Quindi per poter muovere lo spillo alla velocità desiderata e con il carico massimo applicato, alla ruota dentata si deve avere una coppia di 2,2 Nm e deve ruotare a circa 2670 rpm, per cui la potenza minima che deve essere in grado di trasmettere è pari a: 615 W. Partendo da questi dati è possibile effettuare una verifica della resistenza del riduttore.

Si tratta di un ingranaggio ad assi sghembi, a 90°, con ruote elicoidali, per cui le equazioni utilizzate per i calcoli saranno le stesse utilizzate per la verifica delle ruote elicoidali.

Le caratteristiche dei materiali e di forma delle ruote sono riportate nella tabella sottostante:

Pignone	Acciaio 1.2210 (115Cr V3)
Durezza pretrattamenti	722 HB
Sforzo a rottura	750 MPa
Modulo di Young	200000 Mpa
Coefficiente di Possion	0,3
N° denti	10
Modulo normale	1,26 mm
Modulo trasversale	1,78 mm
Diametro primitivo	17,8 mm
Angolo elica	45°
Passo normale	3,96 mm
Passo trasversale	5,60 mm

Tab. 5.3: Dati del pignone.

Ruota dentata	Acciaio 1.2312 (40 CrMnMo S8-6)
Durezza pretrattamenti	543 HB
Sforzo a rottura	1025 MPa
Modulo di Young	205000 Mpa
Coefficiente di Possion	0,3
N° denti	25
Modulo normale	1,26 mm
Modulo trasversale	1,78 mm
Diametro primitivo	44,5 mm
Angolo elica	45°
Passo normale	3,96 mm
Passo trasversale	5,60 mm

Tab. 5.4: Dati della ruota dentata.

Ipotizzando un rendimento del riduttore dell' 80%, si ha una potenza in ingresso di 768,75W. A questo punto si procede con il calcolo del rapporto di trasmissione del riduttore, con il quale è possibile determinarsi il numero di giri del pignone e quindi la coppia e la forza a cui è sottoposto.

$$\tau = \frac{z_2}{z_1} \quad (5.4.17)$$

$$n_1 = \tau n_2 \quad (5.4.18)$$

$$C_1 = \frac{60P_i}{2\pi n_1} \quad (5.4.19)$$

$$F_c = \frac{60000W_i}{\pi n_1 d_1} \quad (5.4.20)$$

Rapporto di trasmissione	2,5
Numero di giri pignone	6675 rpm
Coppia a cui il pignone è sottoposto	0,88 Nm
Forza circonferenziale	123,57 N

Tab. 5.5: Valori del rapporto di trasmissione dell'ingranaggio e del numero di giri, coppia e forza che sono applicati sul pignone e che vengono utilizzati per effettuare i calcoli di verifica.

La verifica in base alla pressione di contatto e alla sollecitazione di flessione viene effettuata sulla ruota dentata più piccola, in quanto è quella più sollecitata.

La massima tensione di contatto è uguale a:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{4K_E F_c \Phi (1 + \tau)}{\sin(2\theta_n) L d_1 \Gamma_t}} \quad (5.4.21)$$

Dove:

$$\Gamma_t = \frac{\sqrt{(z_1 + 2\cos \alpha)^2 - z_1^2 \cos^2 \theta} + \sqrt{(z_2 + 2\cos \alpha)^2 - z_2^2 \cos^2 \theta} - (z_1 + z_2) \sin \theta}{2\pi \cos \theta} \quad (5.4.22)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_n}{\cos \alpha} \right) \quad (5.4.23)$$

$$\Phi = \frac{\cos \alpha_0^3}{\cos \alpha} \quad (5.4.24)$$

$$\cos \alpha_0 = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \theta_n} \quad (5.4.25)$$

$$K_E = \frac{E'_1 E'_2}{\pi(E'_1 + E'_2)} \quad (5.4.26)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (5.4.27)$$

Mentre la tensione massima di contatto ammissibile è pari a:

$$\sigma_0 = \frac{HB}{3} \left(\frac{10^7}{60n_1h} \right)^{\frac{3}{10}} \quad (5.4.28)$$

Sostituendo i valori si ottiene che la tensione massima di contatto è pari a 384,13 MPa, mentre la tensione ammissibile è pari a 426,36 MPa, pertanto l'ingranaggio è verificato per quanto riguarda la pressione di contatto, mentre per la flessione dei denti si utilizza la relazione di Lewis:

$$\sigma_f = \frac{F_c}{Y_f \Gamma_t L m_n} \psi \quad (5.4.29)$$

Dove:

$$\psi = \frac{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \theta_n}{\cos^2 \alpha} \quad (5.4.30)$$

Il fattore Y_f viene ricavato da un diagramma, mentre L è la lunghezza del contatto tra i denti, ed è pari a 22,3 mm. La tensione ammissibile è data dalla seguente equazione:

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_r}{X} \quad (5.4.31)$$

Con X pari a 4 e assunto Y_f pari a 0,387 si ha che la tensione di flessione a cui il dente è sottoposto è di 13,25 MPa, per cui l'ingranaggio risulta verificato anche alla sollecitazione a flessione.



Fig. 5.9: Foto dell'ingranaggio ad assi sghembi a ruote elicoidali

A questo punto, dopo aver verificato la resistenza del riduttore si è passati alla scelta del motore elettrico. Come già detto, la tipologia di motore scelta è la brushless AC, in quanto risulta un buon compromesso tra le varie richieste.

Tra i diversi produttori si è scelto Panasonic in quanto realizza motori molto compatti per le prestazioni che sono in grado di erogare, inoltre anche gli azionamenti del motore insieme al PLC hanno buone caratteristiche e affidabilità.

Anche se dai calcoli risulta necessaria una potenza in ingresso di oltre 760W, si è scelto per realizzare il prototipo un motore con una potenza nominale di 750W.

Le caratteristiche del motore vengono riportate nelle tabelle seguenti:

		AC200 V	
Motor model *1	IP65	MSMD082G1□	MSMD082S1□
	IP67	-	-
Applicable driver *2	Model No.	A5II, A5 series	MCD◇T3520
		A5IE, A5E series	MCD◇T3520E
	Frame symbol	C-frame	
Power supply capacity (kVA)		1.3	
Rated output (W)		750	
Rated torque (N·m)		2.4	
Momentary Max. peak torque (N·m)		7.1	
Rated current (A(rms))		4.0	
Max. current (A(o-p))		17.0	
Regenerative brake frequency (times/min) Note)1	Without option	No limit Note)2	
	DV0P4283	No limit Note)2	
Rated rotational speed (r/min)		3000	
Max. rotational speed (r/min)		4500	
Moment of inertia of rotor ($\times 10^{-4}$ kg·m ²)	Without brake	0.87	
	With brake	0.97	
Recommended moment of inertia ratio of the load and the rotor Note)3		20 times or less	
Rotary encoder specifications Note)5		20-bit Incremental	17-bit Absolute
Resolution per single turn		1048576	131072

Fig. 5.10: Tabella delle caratteristiche del motore elettrico selezionato.

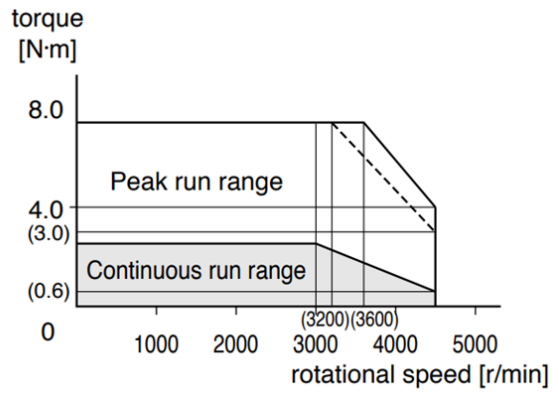
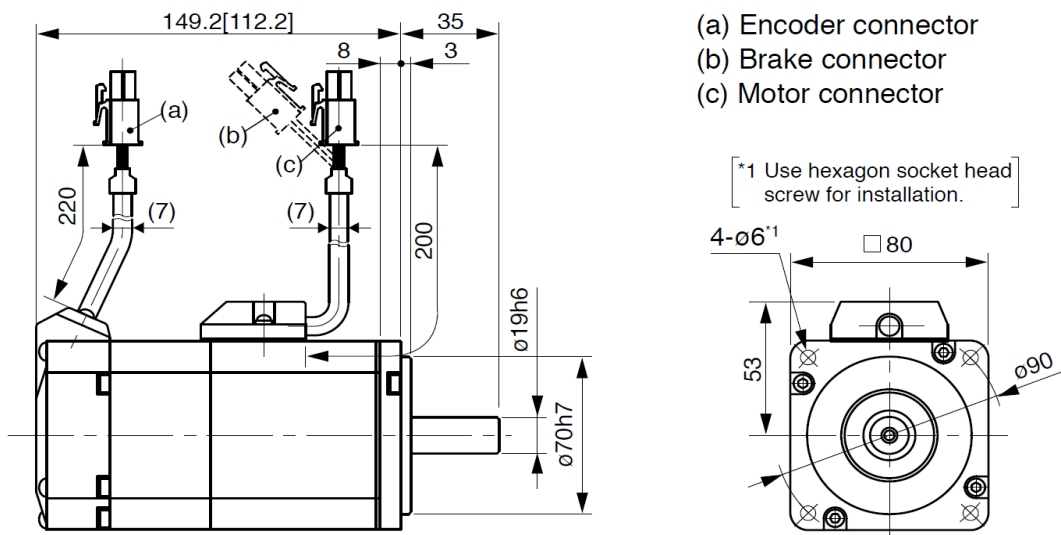


Fig. 5.11: Caratteristica del motore.



Mass: Without brake/ 2.3 kg
With brake/ 3.1 kg

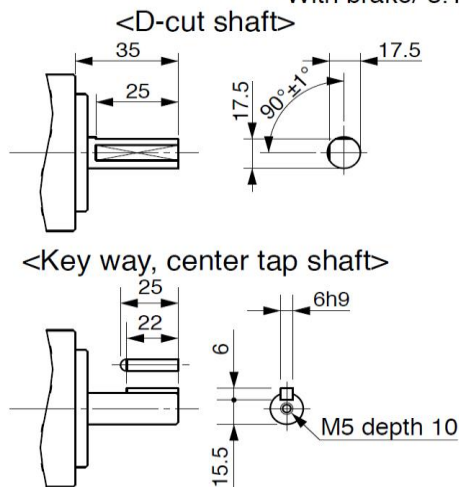


Fig. 5.12: Schema con quote di ingombro del motore.

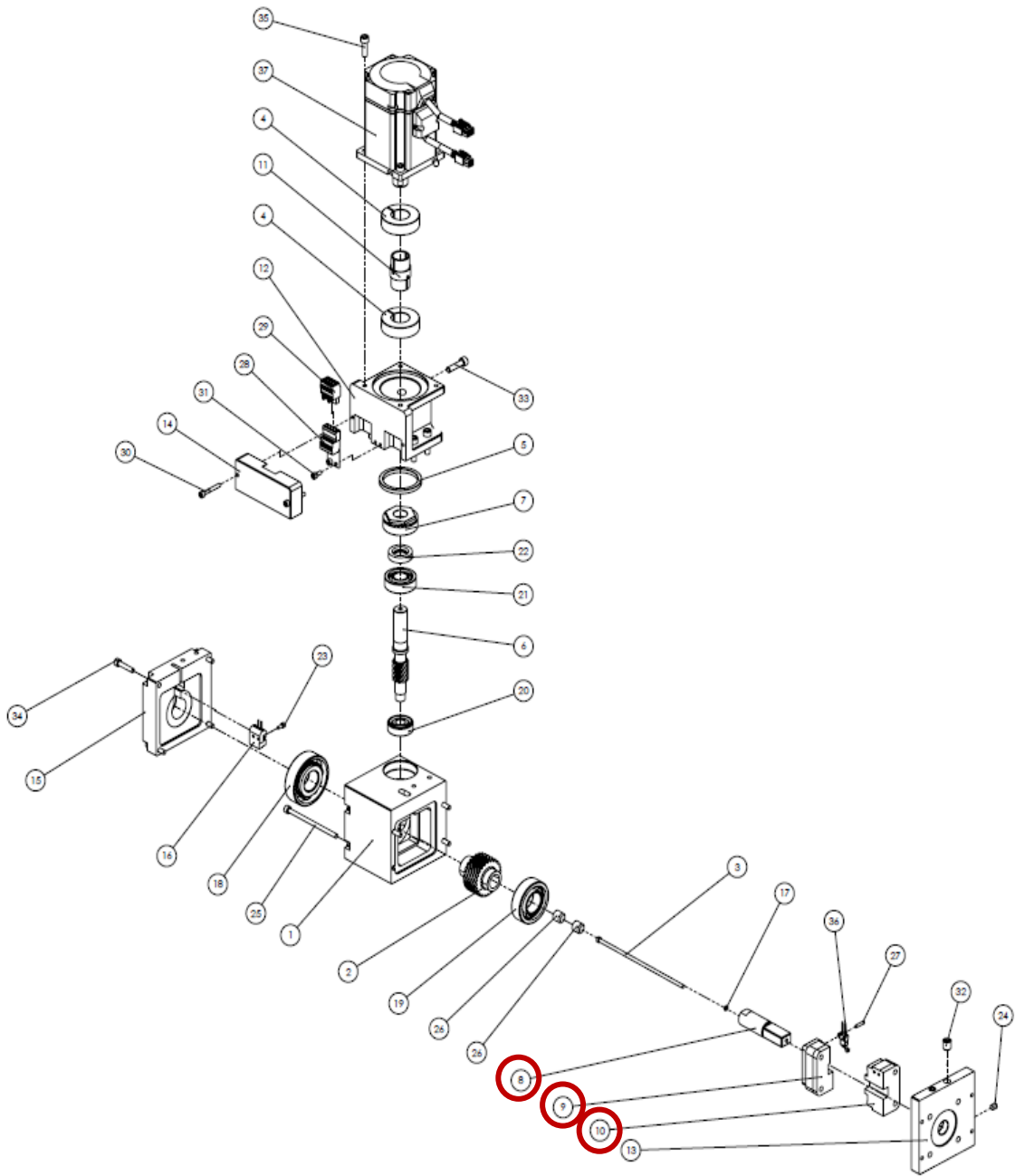


Fig. 5.13: Assieme esploso del pistone elettrico. Le piastrine 9 e 10 (evidenziate in rosso) sono il sistema utilizzato per impedire la rotazione della vite. La parte 8 è la vite.

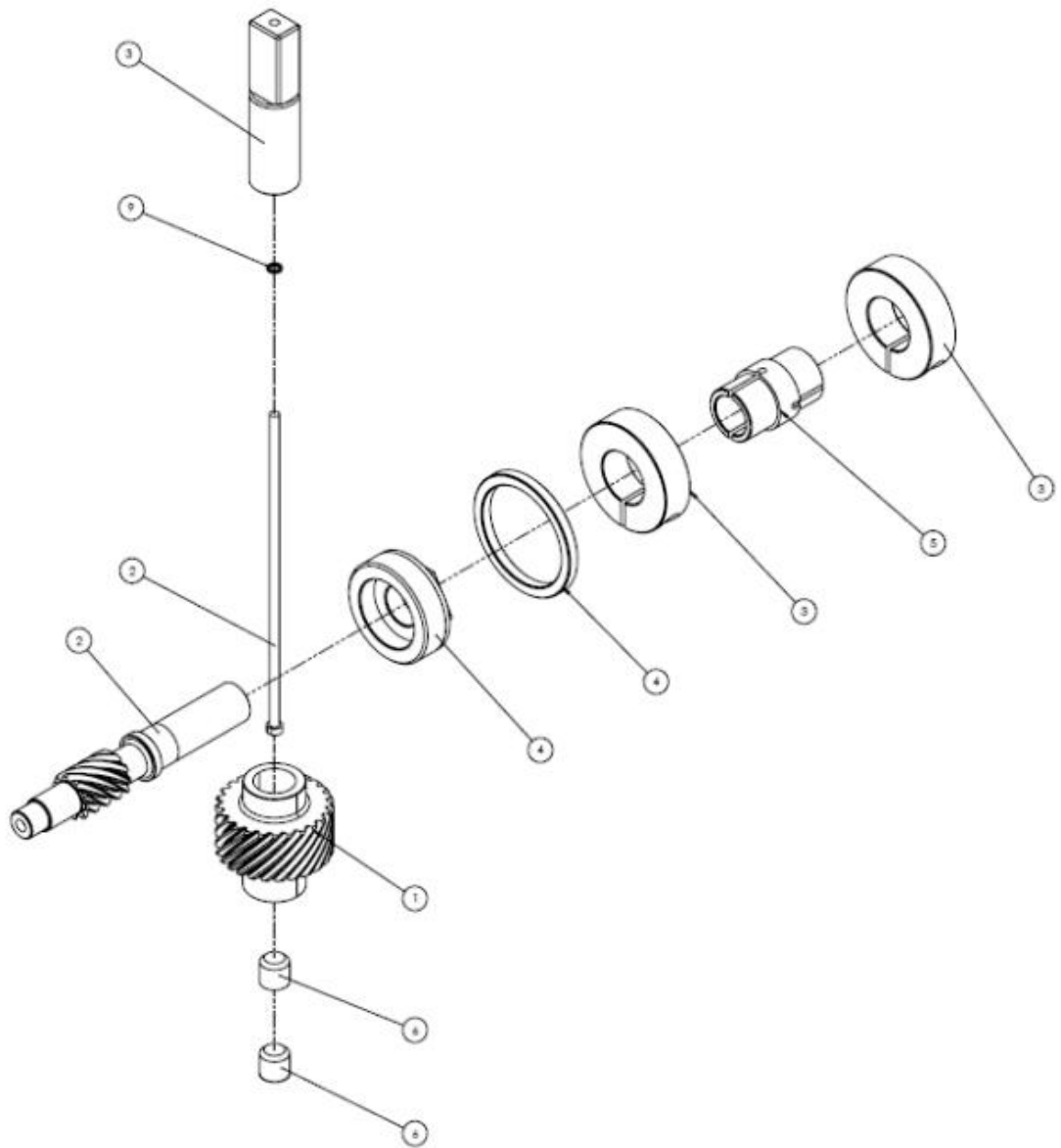


Fig. 5.14: Assieme che mostra più nel dettaglio l'ingranaggio ad assi sghembi ed il meccanismo vite/madrevite.

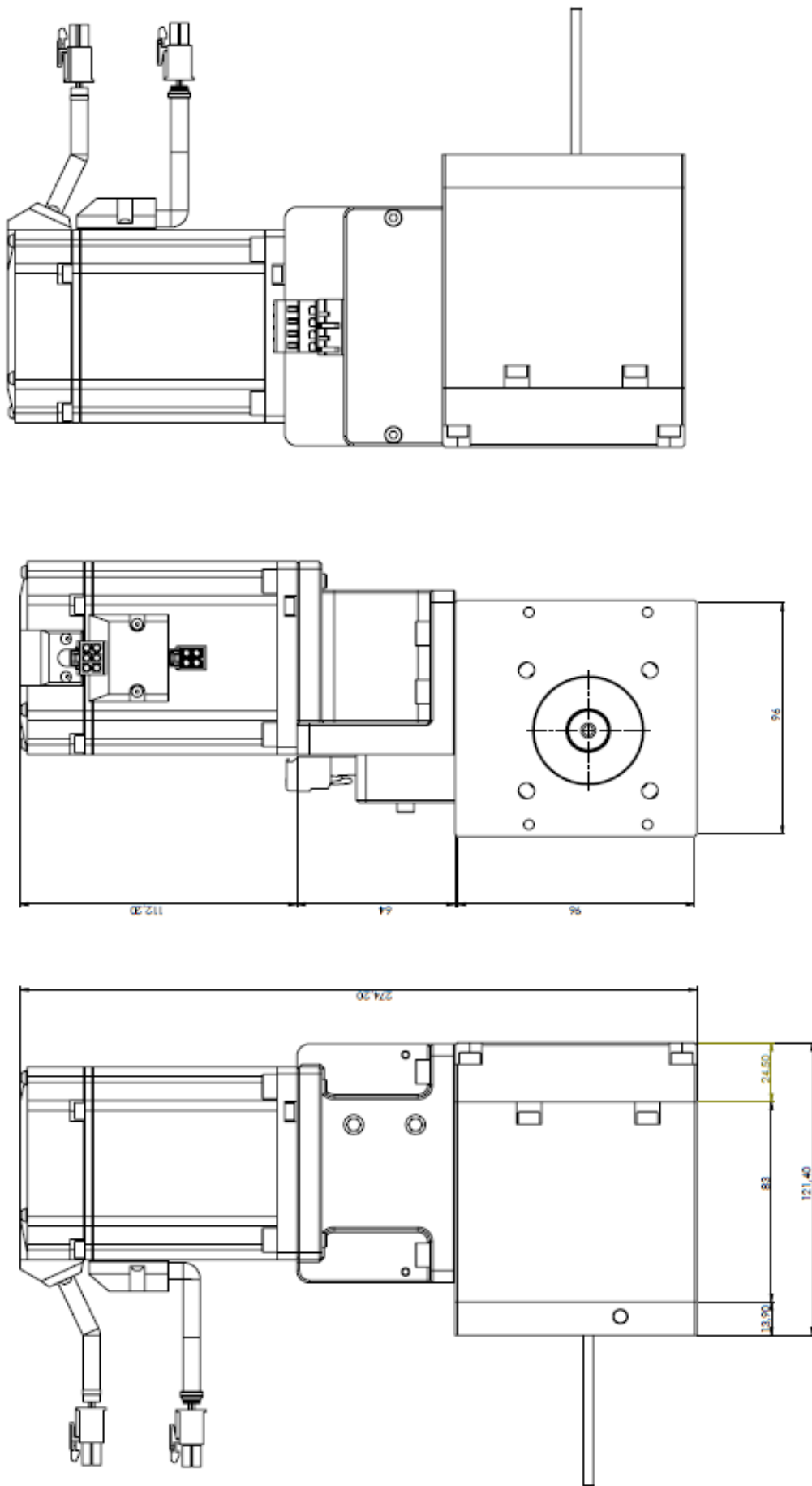


Fig. 5.15: Tavola con viste laterali del pistone, con misure d'ingombro.

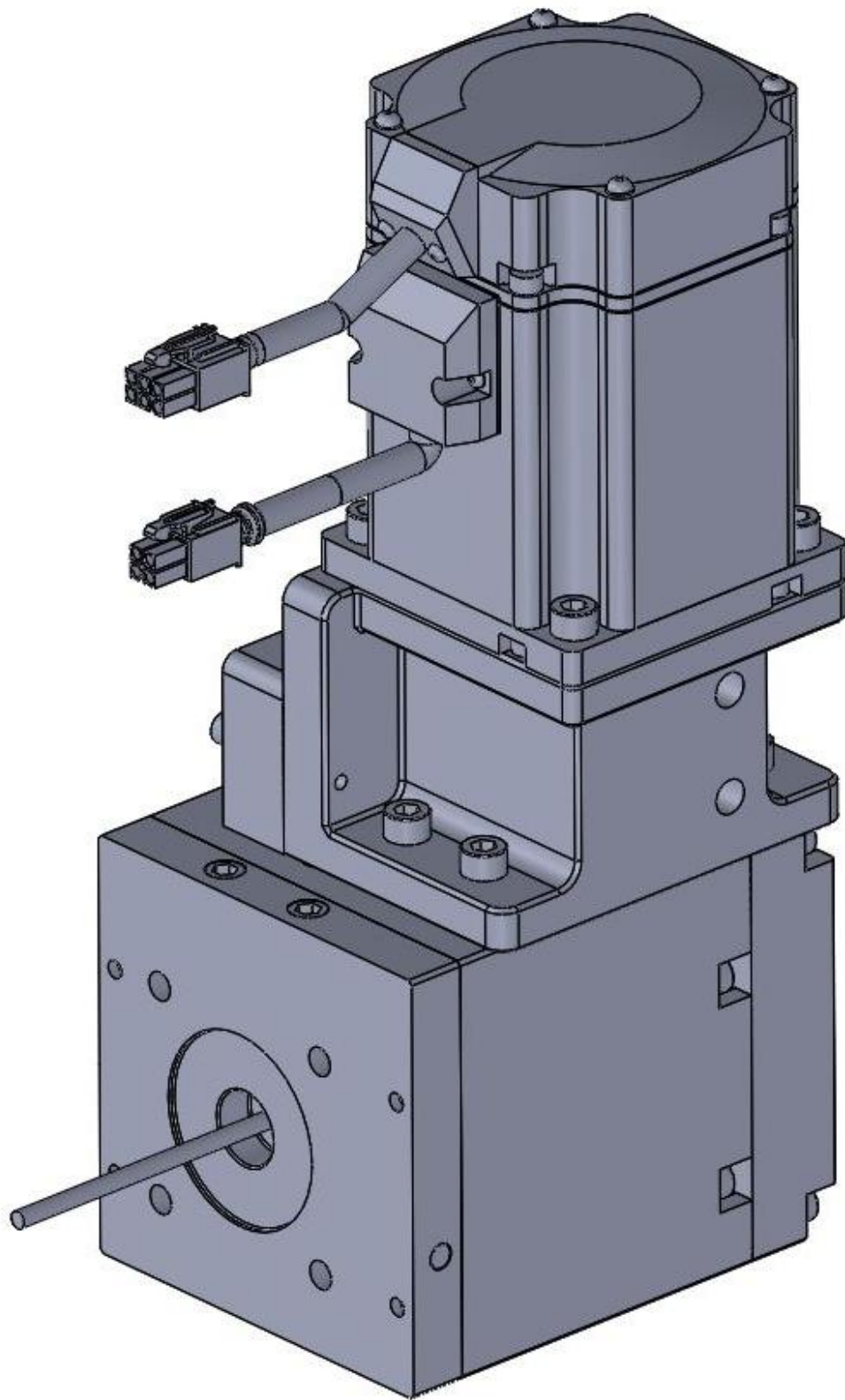


Fig. 5.16: Disegno 3D del pistone elettrico. Da questo disegno si può apprezzare la compattezza del pistone rispetto l'asse longitudinale dello spillo. In questo modo si riesce a ridurre lo spessore della parte fissa dello stampo.

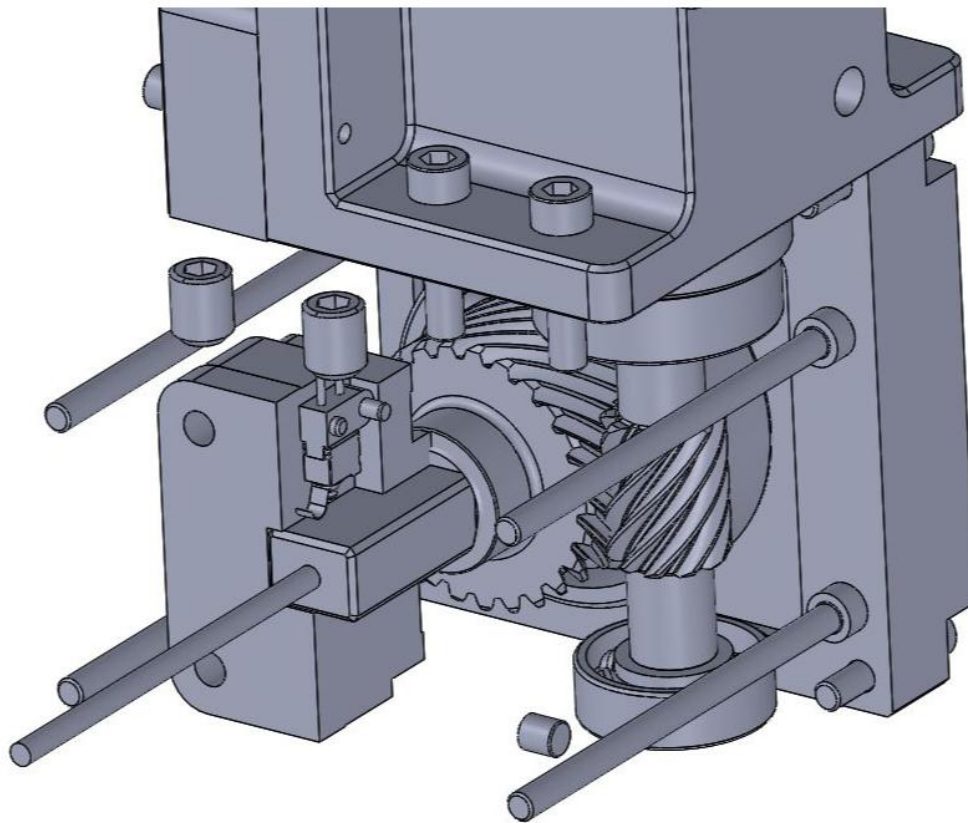


Fig. 5.17: Disegno 3D dei meccanismi che sono racchiusi all'interno del pistone, ossia: vite/madrevite e ingranaggio.

6. Risultati delle prove

Dopo aver realizzato il prototipo sono state effettuate delle prove per validare le ipotesi che sono state fatte in sede di progettazione e per verificare che il sistema sia in grado di soddisfare i requisiti richiesti. In particolare l'azienda era interessata a conoscere i valori di velocità e posizione dello spillo, in funzione del tempo, andando di volta in volta a variare il carico applicato allo spillo e la sua velocità, andando ad impostare il numero di giri del motore elettrico.

Per effettuare questa prova è stata utilizzata una pressa per prove di fatica del laboratorio di costruzione di macchine, della facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche. La pressa (figura 6.1) poggia su di un banco (1), sulla traversa inferiore è montata la cella di carico (2), che ha un fondo scala di 3kN, mentre sulla traversa superiore è fissato il cilindro pneumatico (3).

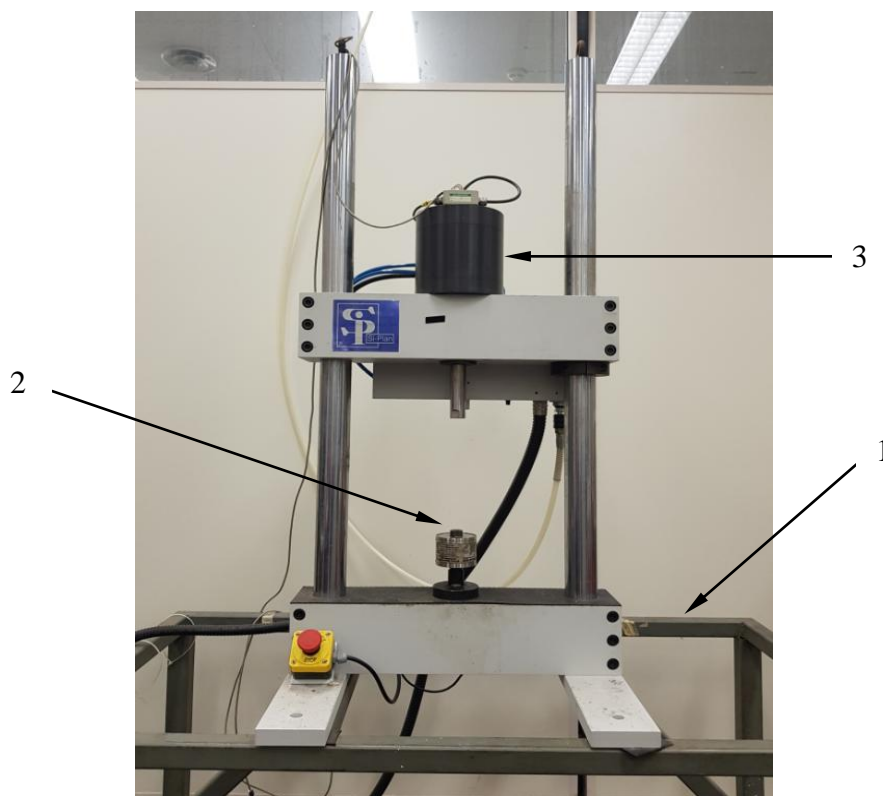


Fig. 6.1: Foto della pressa del laboratorio utilizzata per effettuare le prove. 1-Banco; 2-Cella di carico; 3-Pistone pneumatico.

Come mostrato in figura 6.3, il pistone elettrico è stato fissato ad una piastra (1), sulla quale è stato realizzato un foro filettato per fissarla alla cella di carico (2). A causa della forma a “L” del pistone elettrico (4), il baricentro non coincide con l’asse longitudinale dello spillo, per cui si sono dovuti inserire dei contrappesi (3), montati sulla piastra, così da bilanciare tutto l’assieme.

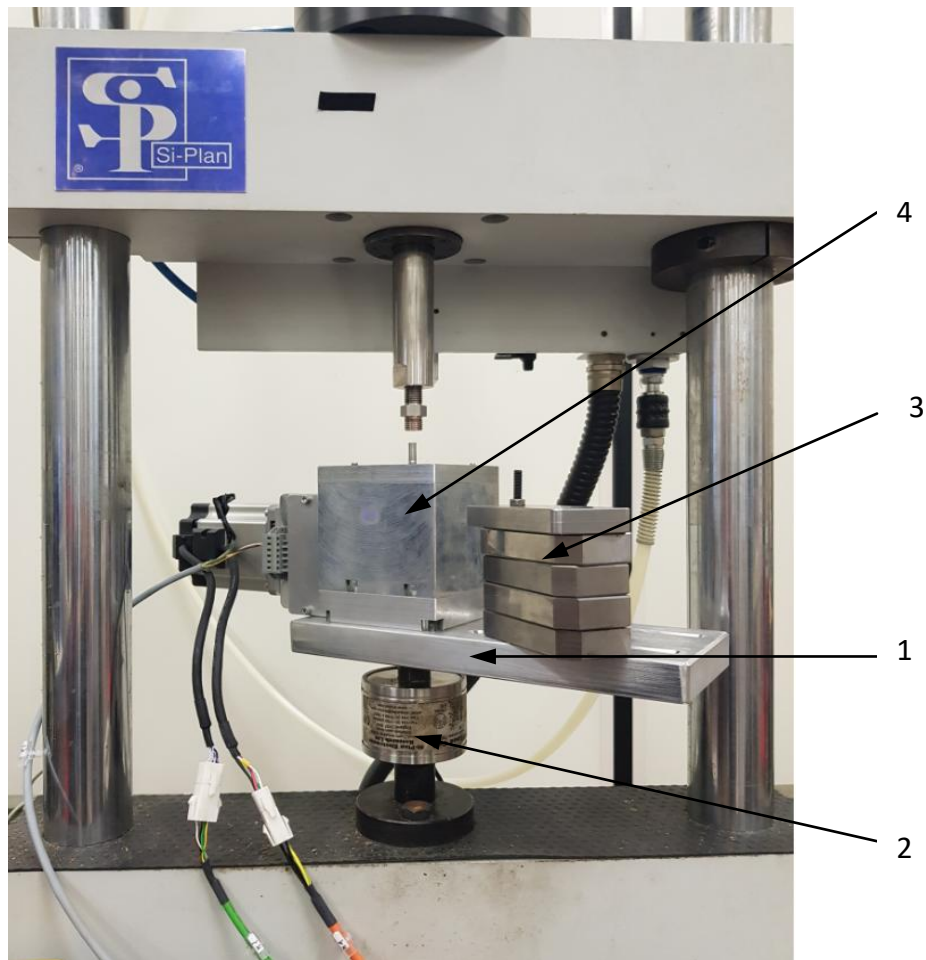


Fig. 6.2: Foto del pistone elettrico montato sulla pressa tramite la piastra. 1-Piastra; 2-Cella di carico; 3-Contrappesi; 4-Pistone elettrico.

Dopo aver messo a punto il sistema si è iniziato con le misurazioni. In pratica si è applicato allo spillo una forza, che grazie ad un controllo in retroazione della pressa, rimaneva costante anche se lo spillo si spostava. Mantenendo costante il carico si andava a variare la velocità del motore elettrico.

Di seguito vengono riportate le tabelle e i grafici con i dati raccolti.

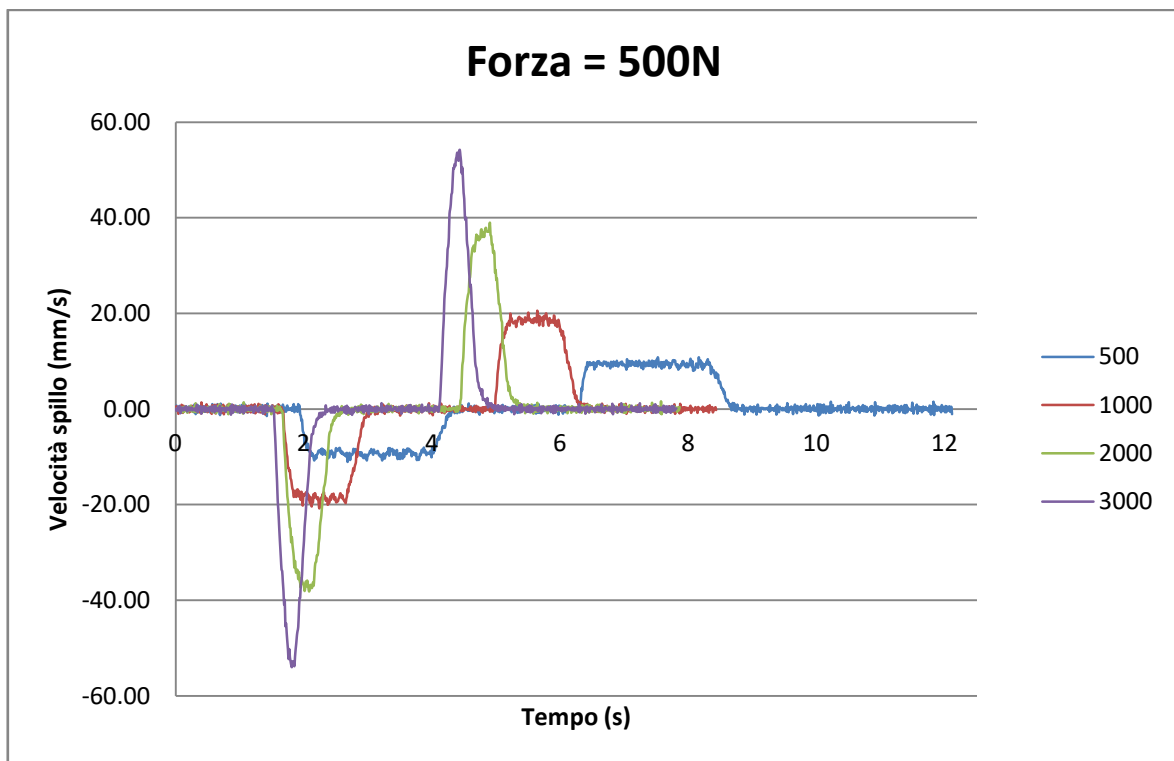
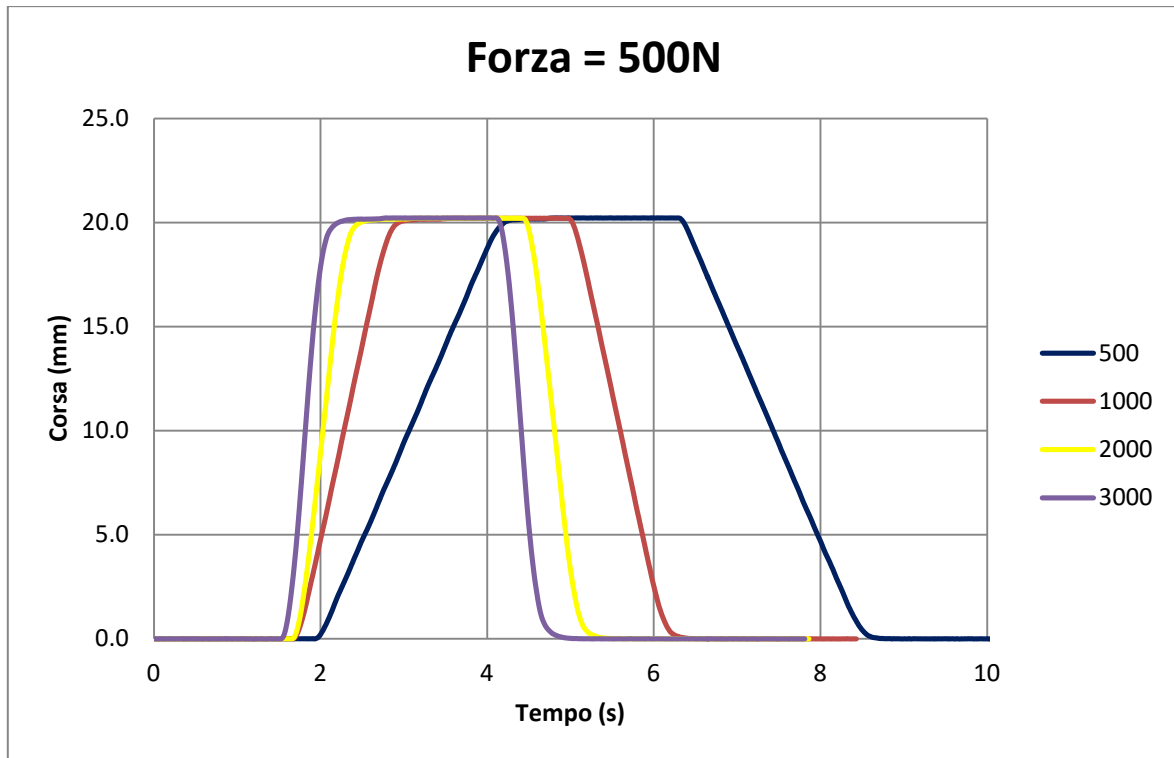


Fig. 6.3: Grafici degli andamenti della corsa e della velocità dello spillo in funzione del tempo, con una forza applicata allo spillo di 500N.

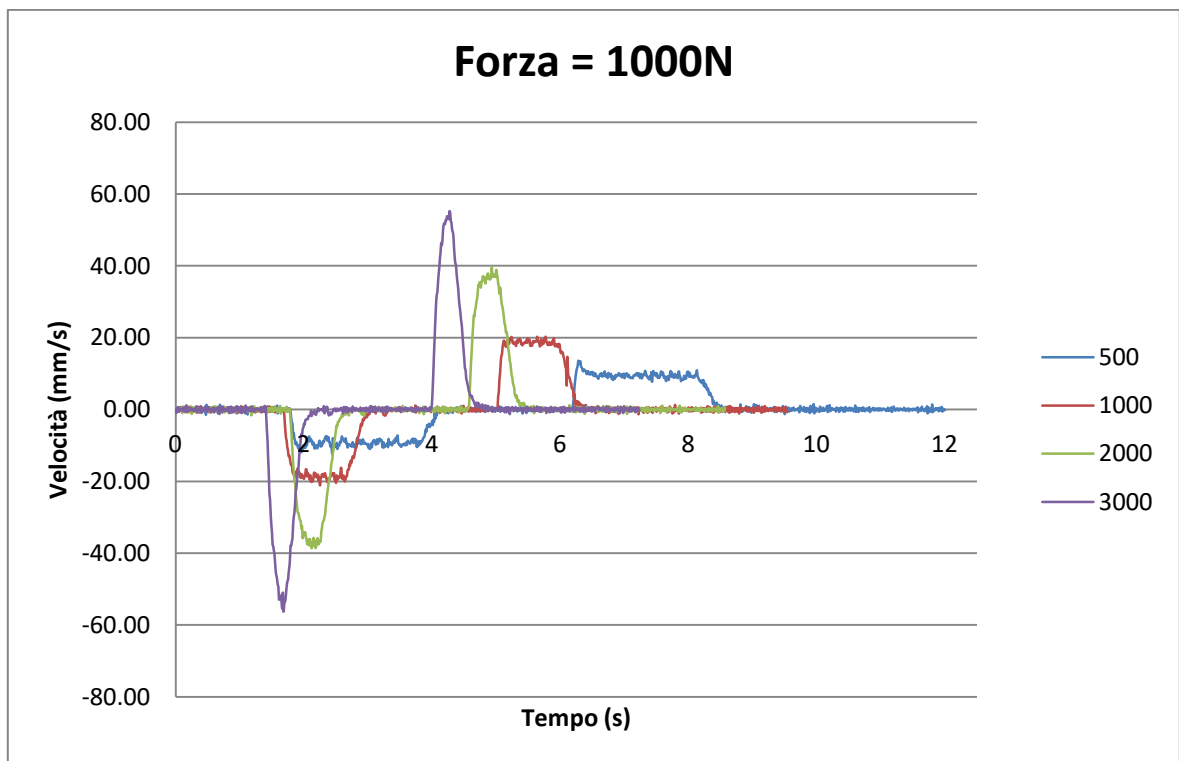
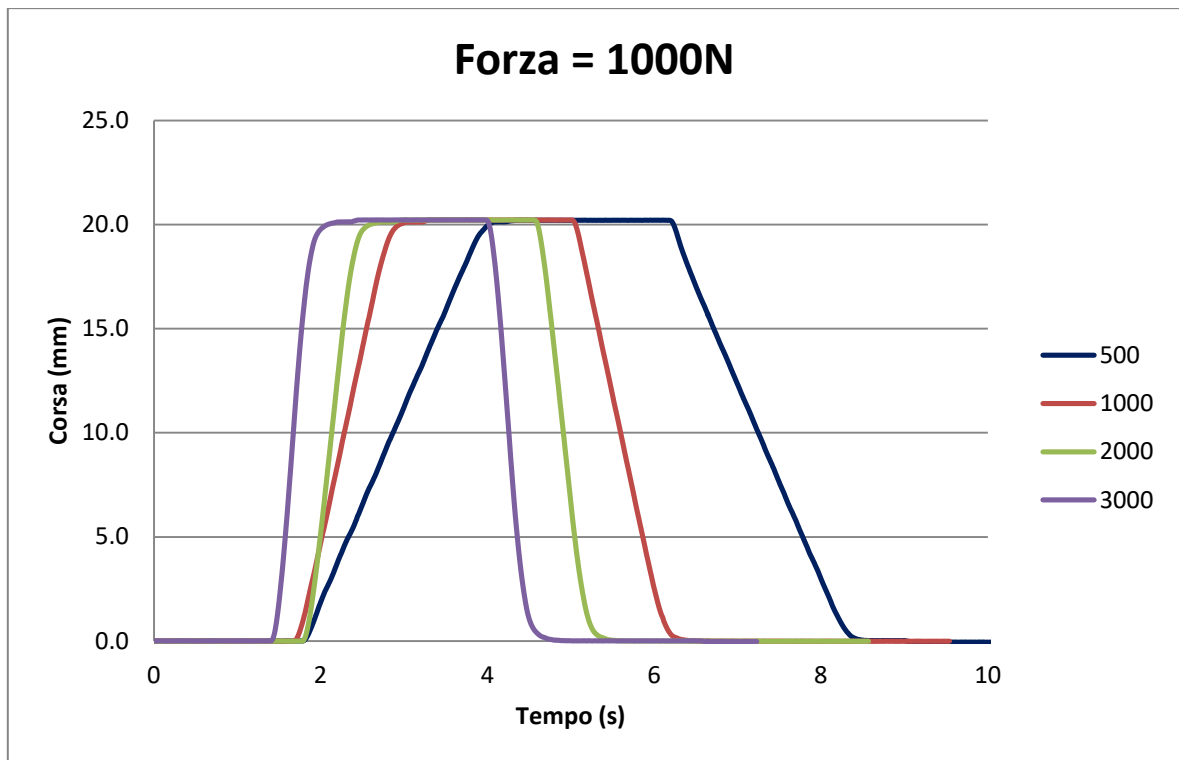


Fig. 6.4: Grafici degli andamenti della corsa e della velocità dello spillo in funzione del tempo, con una forza applicata allo spillo di 1000N.

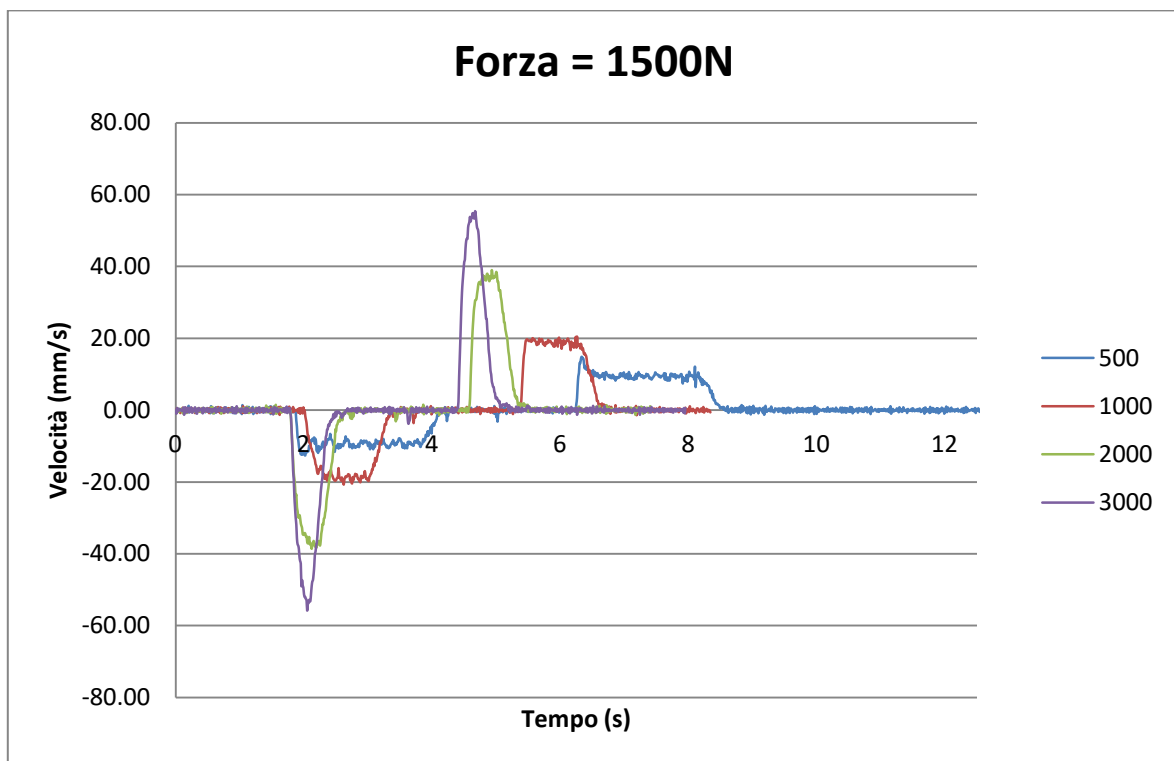
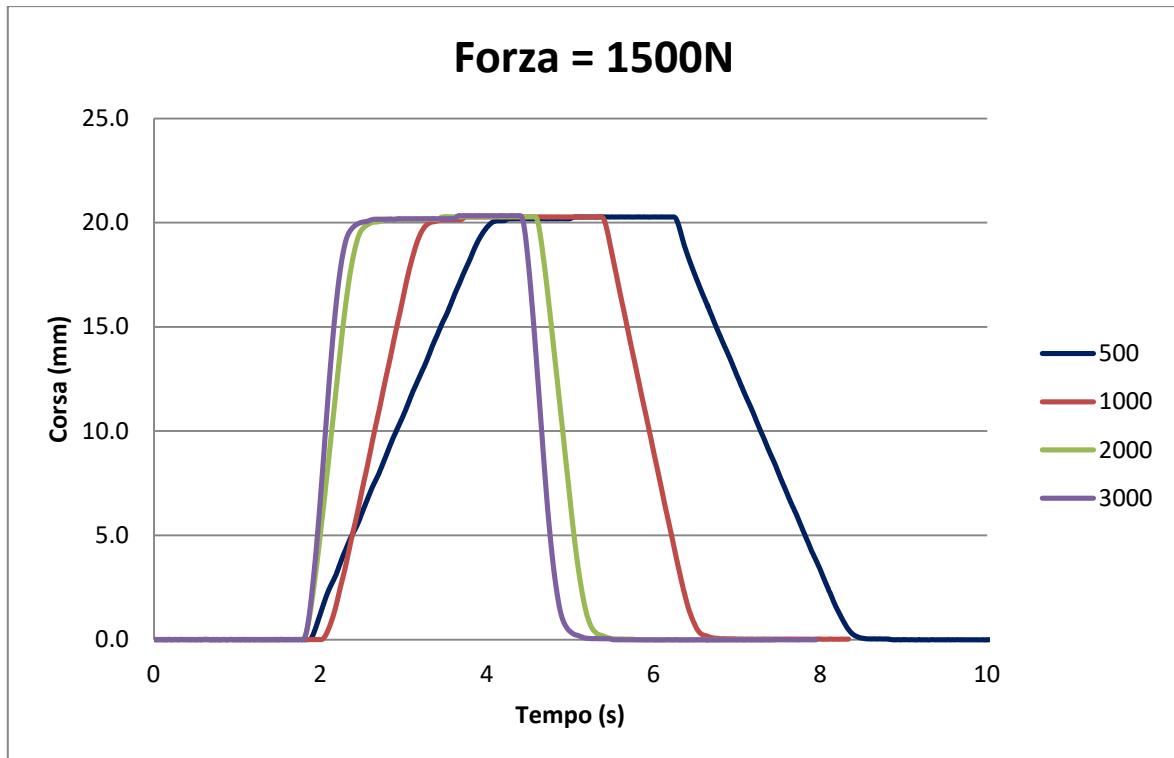


Fig. 6.5: Grafici degli andamenti della corsa e della velocità dello spillo in funzione del tempo, con una forza applicata allo spillo di 1500N.

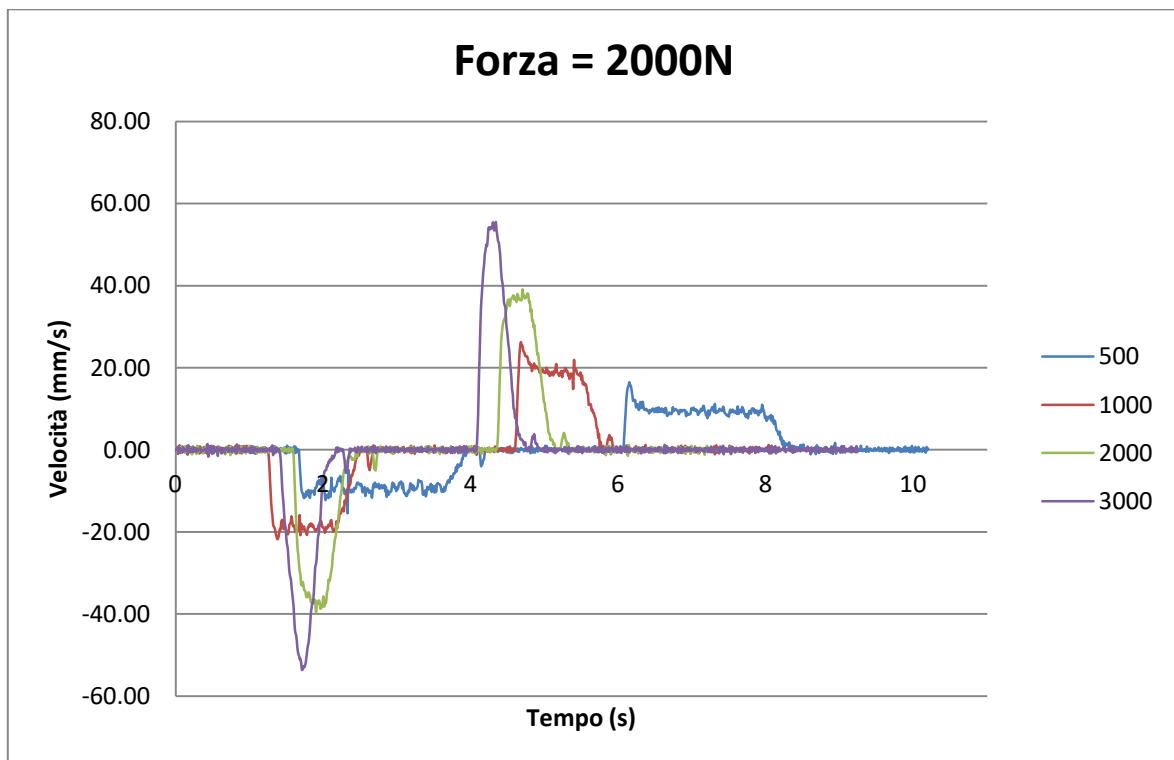
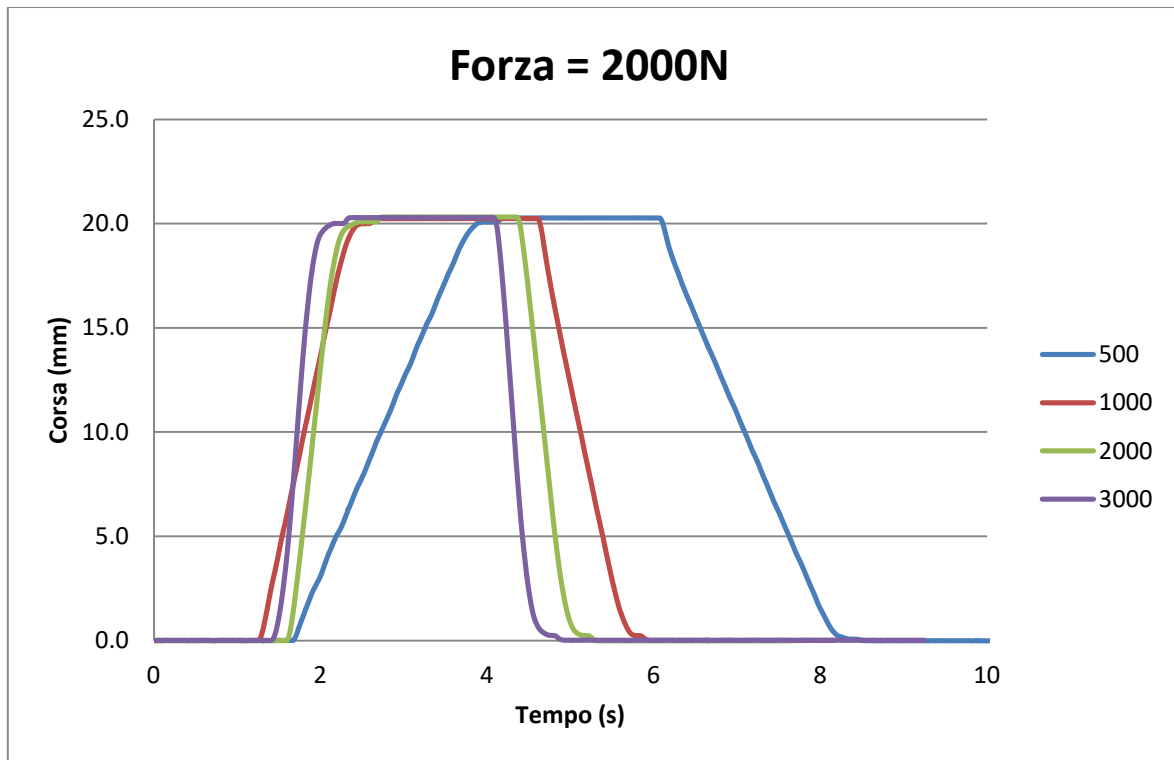


Fig. 6.6: Grafici degli andamenti della corsa e della velocità dello spillo in funzione del tempo, con una forza applicata allo spillo di 2000N.

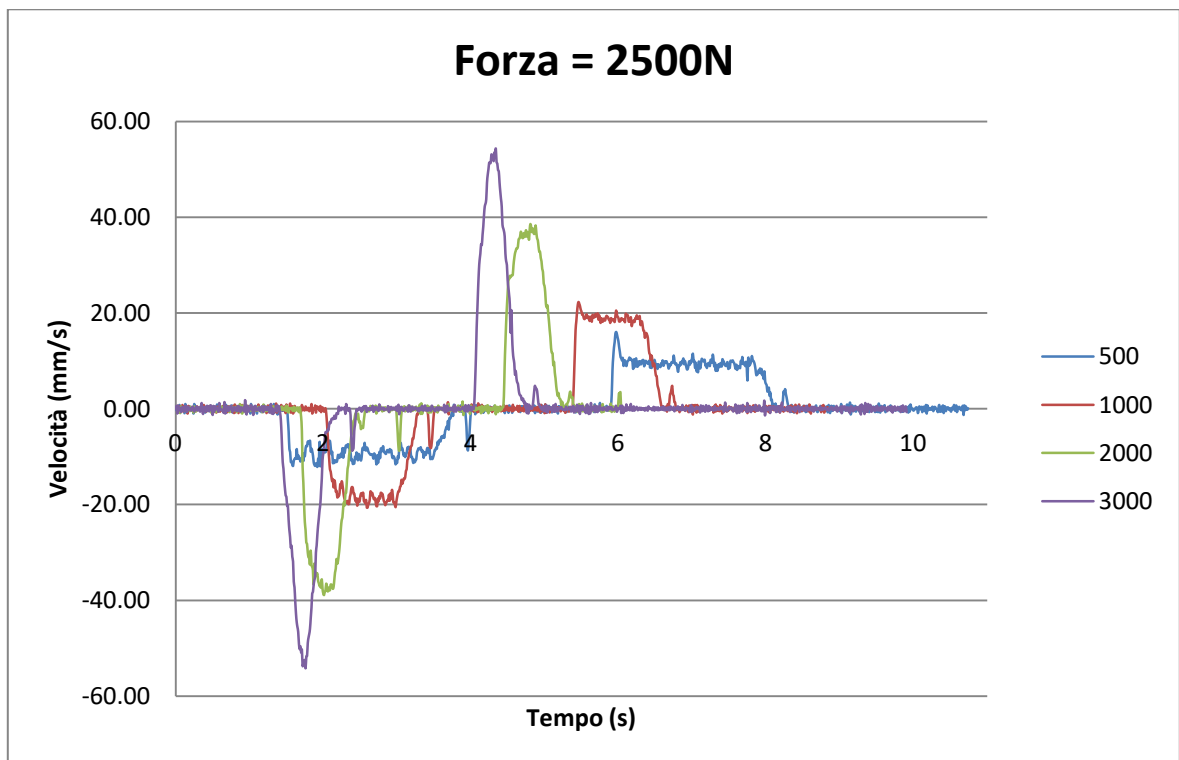
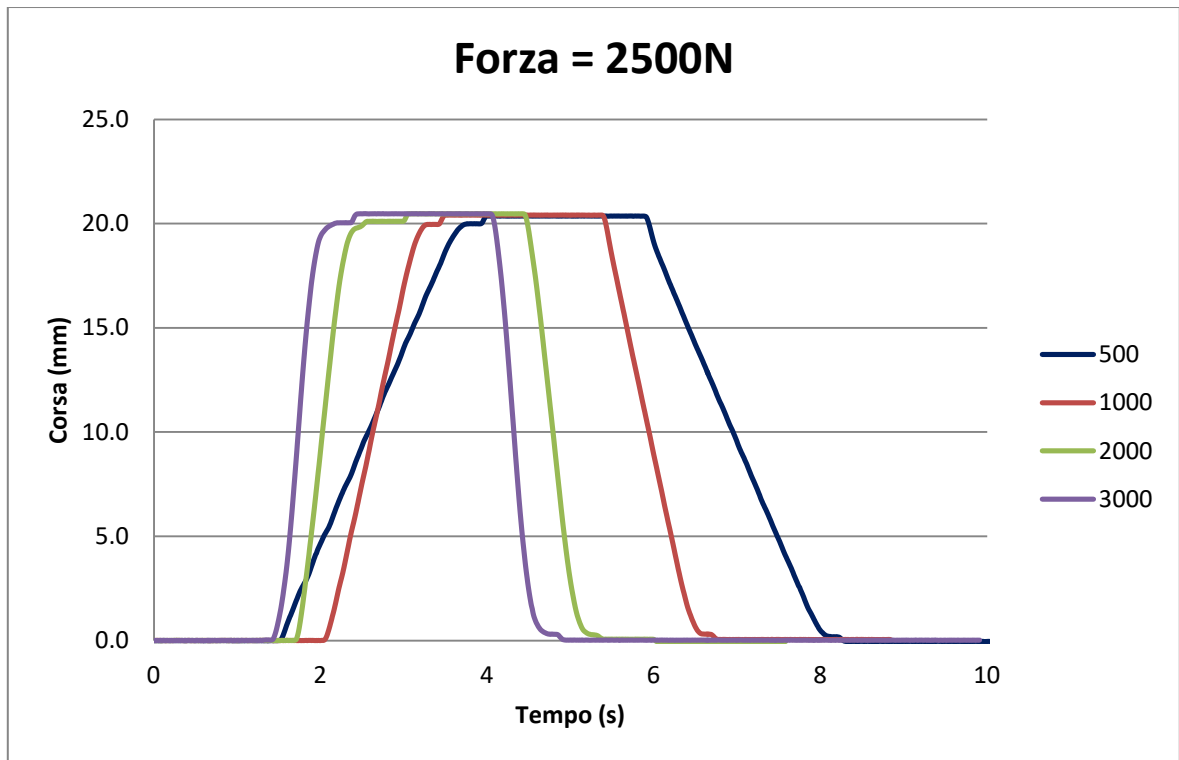


Fig. 6.7: Grafici degli andamenti della corsa e della velocità dello spillo in funzione del tempo, con una forza applicata allo spillo di 2500N.

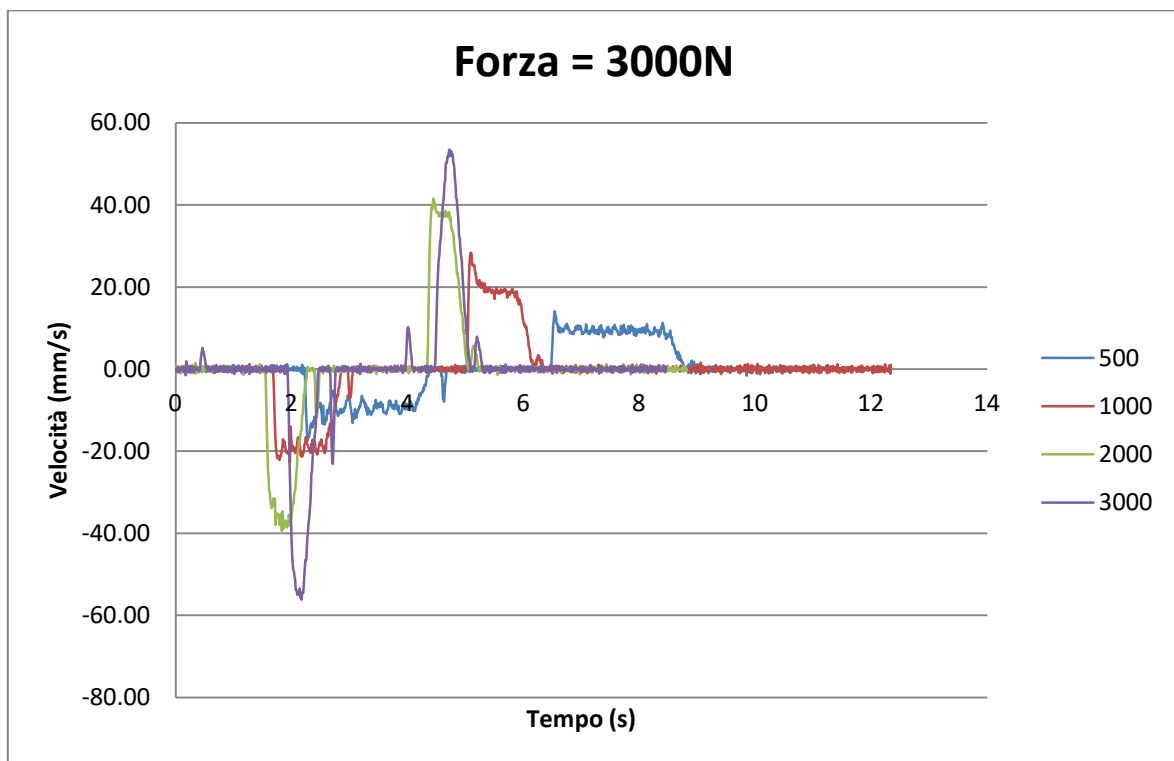
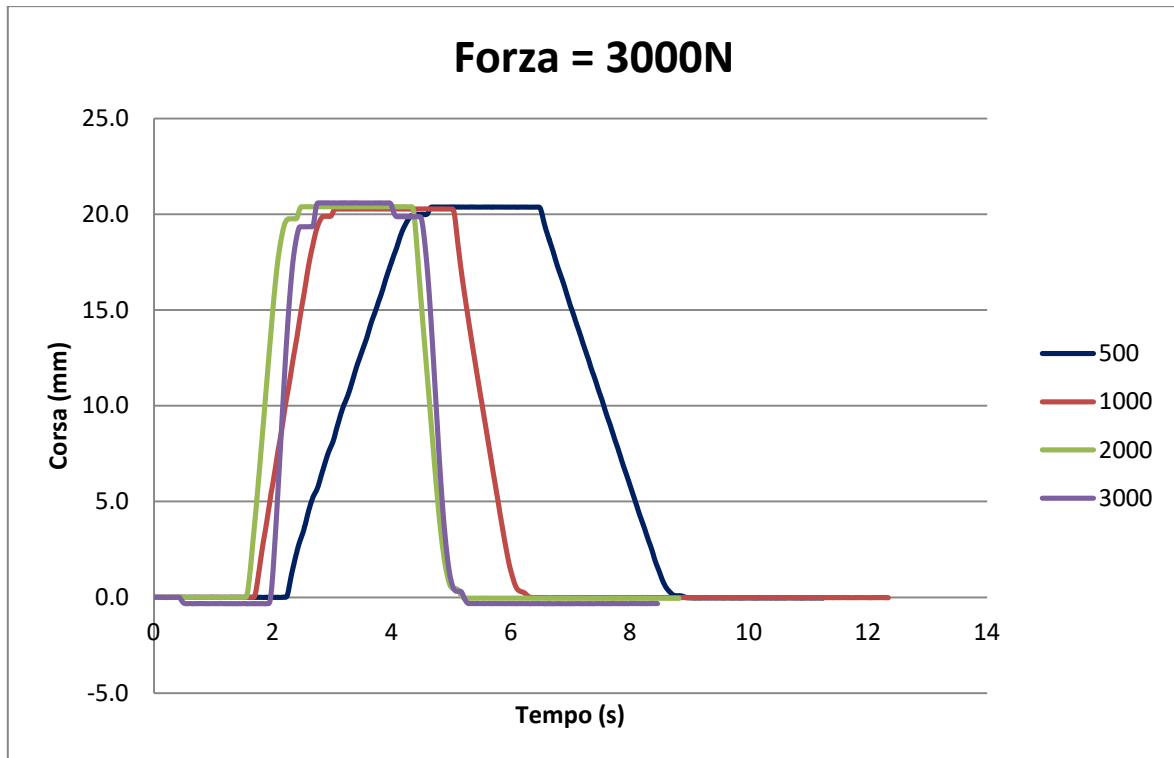


Fig. 6.8: Grafici degli andamenti della corsa e della velocità dello spillo in funzione del tempo, con una forza applicata allo spillo di 3000N.

Si può osservare che variando il carico la forma delle curve rimane pressoché invariata, mentre si ha una variazione dell'ampiezza. Dai dati si è avuta una conferma che le prestazioni del pistone elettrico sono in linea con quelle ipotizzate.

Per avere un'ulteriore conferma sono stati confrontati i valori dei tempi di chiusura, e delle velocità medie, a parità di velocità del motore elettrico e andando a variare la forza applicata allo spillo. Il risultato è che fissata la velocità del motore elettrico, anche se il carico è maggiore, il tempo di chiusura rimane pressoché costante.

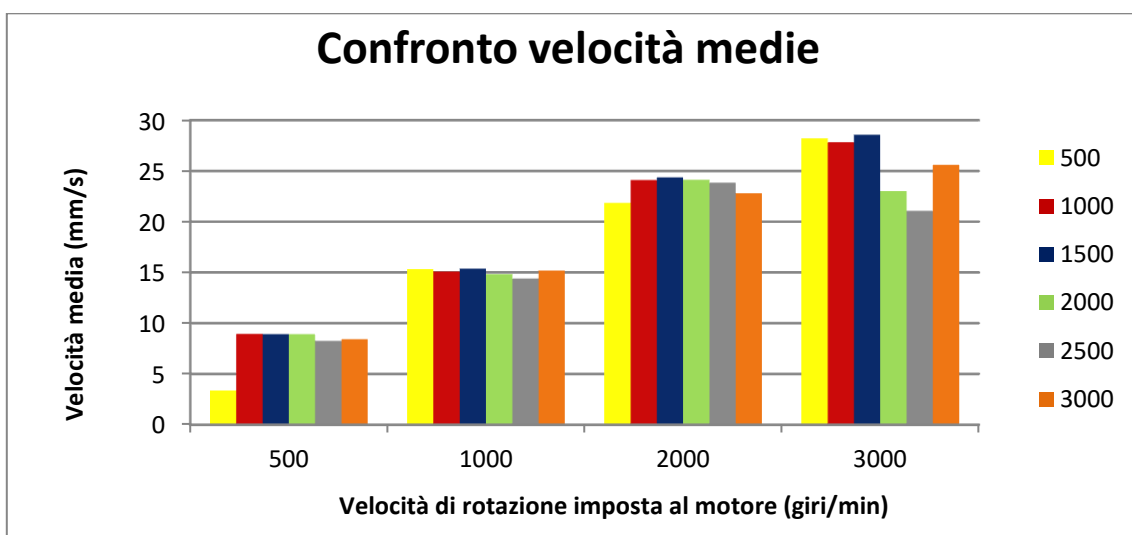
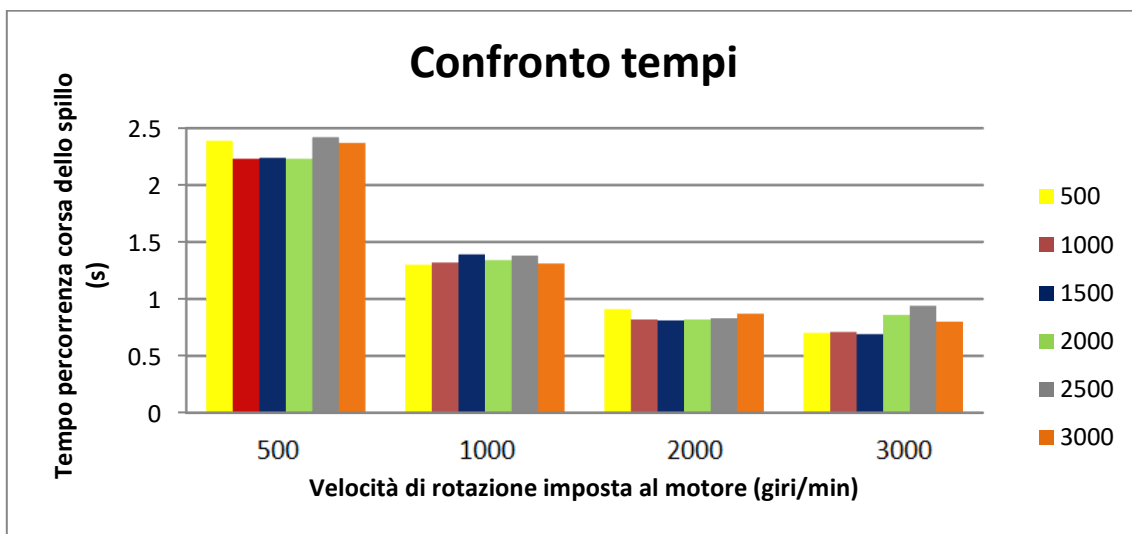


Fig. 6.9: Il primo grafico mostra il tempo di chiusura dello spillo a parità di velocità del motore e andando a variare il carico. Il secondo invece mostra le velocità medie.

7. Conclusioni

Con l'aumento della quantità di materiali termoplastici trasformati mediante stampaggio ad iniezione ci sarà anche un aumento della richiesta di stampi provvisti di camera calda con otturatori, e questo per i motivi detti nel primo capitolo della tesi: la richiesta di oggetti di forma complessa e il metal replacement, soprattutto nel settore dell'automotive, richiederà stampi con prestazioni sempre maggiori, e un miglior controllo del processo di iniezione. Questo si traduce sostanzialmente in un'applicazione di sistemi a canale caldo provvisti di ugelli con valvola, ossia di sistema di otturazione.

Fin'ora questi sistemi venivano comandati mediante cilindri oleodinamici o pneumatici, che nella maggior parte dei casi venivano controllati dai sistemi di cui la pressa è provvista. La richiesta, da parte del mercato, di sistemi con prestazioni sempre maggiori ha messo ancora di più in risalto gli aspetti negativi degli attuatori tradizionali. Innanzitutto si ha un problema di affidabilità, che ancora oggi si fa fatica a risolvere, dovuto principalmente alle guarnizioni del cilindro e del pistone, che si usurano e causano un progressivo calo delle prestazioni del cilindro, per cui la forza generata dal pistone che chiude il punto di iniezione non è costante, ma diminuisce nel tempo. Inoltre, ben più gravi sono le perdite di fluido che si hanno dal cilindro, che vanno ad imbrattare tutto lo stampo e ad inquinare il materiale fuso mentre attraversa i canali della camera calda.

Tuttavia il limite più importante dei cilindri oleodinamici e pneumatici è rappresentato dalla difficoltà nel controllarli. Gli unici parametri che possono essere direttamente variati da un operatore sono: la pressione del fluido e la corsa, tutto il resto come: velocità del pistone, legge di moto, posizione in funzione del tempo, ripetibilità, ecc. non è controllabile.

Inoltre se si hanno più otturatori e si vogliono realizzare tecniche di stampaggio particolari come quella a sandwich o sequenziale, diventa molto complesso e costoso da realizzare con gli attuatori tradizionali.

Il lavoro di questa tesi è iniziato andando a ricercare un attuatore elettrico che possa sostituire gli attuatori tradizionali e studiare poi i vari sistemi che consentono un moto lineare, un buon controllo e siano in grado di generare le forze richieste.

Tramite questa tesi sono stati mostrati i vari sistemi che il mercato e le tecnologie mettono a disposizione, mettendo in evidenza i vantaggi e gli svantaggi di ciascuno di essi. Alla fine si è ottenuto quello che al momento risulta essere la combinazione migliore, ossia: motore elettrico accoppiato con un meccanismo vite/madrevite.

Questa combinazione risulta la migliore in quanto è in grado di soddisfare la maggior parte dei requisiti, infatti:

1. Il motore elettrico, controllato tramite un PLC, permette di realizzare dei movimenti con una legge di moto che possiamo definire in base alle nostre esigenze. Inoltre se ogni singolo otturatore viene attuato da un motore elettrico, si ha la possibilità di regolare l'istante di apertura e chiusura di ogni motore rispetto al tempo di iniezione e agli altri attuatori.
2. Si riescono a raggiungere le forze e le velocità richieste.
3. Il sistema rimane abbastanza compatto, e quindi è possibile montarlo all'interno di uno stampo, senza grosse complicazioni.

Al fine di renderci conto se le ipotesi fatte sono valide, si è realizzato un prototipo funzionale, che è stato utilizzato per effettuare delle prove. I risultati sono stati positivi e soprattutto hanno dimostrato la fattibilità del progetto, confermando l'intenzione a voler continuare a sviluppare questo sistema. Tuttavia le problematiche da risolvere sono ancora molte, sia dal punto di vista ingegneristico che economico.

Partendo dal meccanismo vite/madrevite, il primo problema da risolvere è quello della scelta dei materiali. Infatti pensiamo che il bronzo non possa andar bene in quanto ad alte temperature ha un calo della resistenza meccanica maggiore rispetto all'acciaio. La sua scelta è stata dettata dal fatto che il materiale della vite e della madrevite devono essere diversi, al fine di mantenere il coefficiente di attrito tra le due superfici sufficientemente basso, così da evitare il grippaggio.

La possibilità di farlo acciaio-acciaio esiste, ma bisogna individuare il trattamento superficiale che permette di mantenere una certa porosità, pur mantenendo un basso coefficiente di attrito. In questo modo il lubrificante permane nella zona di strisciamento.

Bisogna studiare più attentamente il profilo della vite. Nel prototipo realizzato si è scelto un profilo metrico e unificato quando in realtà nelle operazioni di conversione del moto il profilo più adatto sarebbe quello trapezoidale. Inoltre variando il numero di principi della vite si potrebbe ottenere delle velocità di traslazione dello spillo molto più alte a parità di velocità di traslazione. L'ideale sarebbe adottare sistemi a ricircolo di sfere, ma l'elevato ingombro e i costi non ne giustificano a sufficienza l'applicazione.

La seconda questione che va trattata più dettagliatamente è il tipo di riduttore da utilizzare. Premesso che un riduttore deve comunque essere applicato, in quanto permette di poter avere l'asse dello spillo non allineato con quello del motore elettrico, e quindi di poterlo orientare in modo da rendere il sistema più compatto, bisogna capire quale sia il migliore da scegliere.

Infatti un riduttore ad assi sghembi con ruote elicoidali, come quello del prototipo, ha un rendimento che in genere è inferiore al 90%, è particolarmente complesso da realizzare, necessita di due coppie di cuscinetti obliqui, si usura molto più velocemente e in genere viene utilizzato per rapporti di trasmissioni più alti rispetto a quello adottato nel nostro caso.

Una valida alternativa potrebbe essere l'utilizzo di ingranaggi conici, che permettono bassi rapporti di trasmissione e di trasmettere potenze elevate senza avere troppa usura, senza perdere compattezza e mantenendo l'angolo tra l'asse dello spillo e del motore a 90°.

Un altro problema che non è stato approfondito abbastanza è quello delle temperature. Gli attuatori degli otturatori in genere vengono fissati al manifold, sulla superficie opposta a quella su cui vengono fissati gli ugelli. Quindi, qualora il pistone elettrico venisse fissato in questo modo, si troverebbe in un ambiente con una temperatura minima intorno ai 100°C, fino ad un massimo che può raggiungere i 400°C.

Per questo è molto importante valutare bene quali possono essere le dilatazioni termiche delle varie parti, in modo da lasciare un gioco sufficiente così da poterle compensare.

Mentre per quanto riguarda il motore elettrico, il suo limite è dato dalla pellicola che ricopre gli avvolgimenti di rame, e che quindi non li fa cortocircuitare. Questo materiale ad alte temperature cede, per cui il motore si rompe.

Infine, sempre per quanto riguarda il motore, all'aumentare delle temperature aumentano le perdite, perciò si ha un calo notevole delle prestazioni del motore.

Insomma, il motore elettrico rappresenta il punto più debole di tutto il sistema, anche se esistono diverse soluzioni per poter arginare il problema. Una potrebbe essere quella di isolare il motore elettrico tramite una piastra di materiale isolante, o addirittura isolarlo tramite una copertura raffreddata mediante un fluido. Oppure si potrebbe sfruttare l'orientamento a 90° degli assi del motore e dello spillo, quindi portare il motore il più lontano possibile dalla sorgente di calore, e collegare il motore con il riduttore tramite un albero.

Un'altra questione particolarmente importante è il controllo. Nel prototipo realizzato si è utilizzato un PLC programmato mediante l'utilizzo di un linguaggio grafico. In realtà per ottenere il massimo delle prestazioni da questi sistemi si dovrebbe realizzare un programma specifico, con un linguaggio più complesso, che permetta di realizzare funzioni personalizzate.

Quindi gli aspetti tecnici da approfondire sono molti, ma per poterlo fare non bastano calcoli e simulazioni, in quanto si tratta di un'applicazione di cui non si hanno dati sufficienti e soprattutto che è unica, ovvero ogni stampo è diverso dagli altri, per cui è molto difficile riuscire a realizzare un unico prodotto che possa andare bene per tutti. Per questi motivi è molto importante iniziare a far operare il pistone elettrico in una situazione che sia il più reale possibile, e incominciare a raccogliere dati e informazioni utili al suo sviluppo e miglioramento.

L'obiettivo finale è quello di realizzare un prodotto che soddisfi le esigenze del mercato, e soprattutto che sia affidabile e il suo costo non sia troppo alto rispetto agli attuatori tradizionali. Anche per questo motivo è molto importante selezionare correttamente i vari processi di fabbricazione.

È difficile pensare che il pistone elettrico possa un giorno sostituire gli attuatori tradizionali. Tuttavia migliorando la parte meccanica e sviluppando quella software, si potrebbe ottenere in futuro, un prodotto di cui in certe applicazioni non si può fare a meno.

In particolare per gli oggetti complessi e di grandi dimensioni, dove si ha bisogno dell'iniezione sequenziale, oppure per effettuare l'iniezione a sandwich, che in futuro sarà sempre più richiesta in quanto permette di utilizzare elevate quantità di materiale riciclato, garantendo comunque buone caratteristiche estetiche e proprietà meccaniche.

Questi sistemi potrebbero essere provvisti di diversi sensori che ci possono fornire diverse informazioni sul processo, ma lo sviluppo più ambizioso di questi otturatori è quello di fare a meno dei canali caldi equilibrati.

Infatti, quando si hanno stampi con più cavità o con più punti di iniezione, è molto importante fare in modo che pressione e temperatura del fuso all'interno dei canali, e ai vari punti di iniezione, siano per tutti uguali. Perciò i canali di alimentazione vengono realizzati in modo da essere simmetrici e facendo attenzione a variare il diametro nel modo giusto.

Con l'utilizzo di attuatori elettrici per muovere gli spilli, combinati con dei sensori, sarà possibile realizzare dei canali di alimentazione più complessi, in grado di soddisfare meglio le esigenze e senza preoccuparci troppo dell'equilibratura. Il funzionamento sarebbe il seguente: durante la fase di iniezione i sensori misurano la pressione del fuso, inviano il segnale ad un microprocessore che analizza le varie informazioni e invia un segnale all'attuatore per aprire o chiudere lo spillo, così da correggere il valore della pressione, in tempo reale. In sostanza l'otturatore non è più solo una valvola che apre e chiude il gate dell'ugello, ma che regola anche istantaneamente la caduta di pressione, permettendo così ogni volta di avere le migliori condizioni di stampaggio. Per far ciò però è necessario uno sviluppo notevole della parte software.

Più realistico invece è un'applicazione per muovere i piattelli di estrazione, gli inserti o gli estrattori negli stampi per il packaging, dove sono richieste alte velocità, affidabilità e ripetibilità. Tutte caratteristiche che un attuatore elettrico è in grado di fornire.

Bibliografia

- [1] The Future of Petrochemicals Towards more sustainable plastics and fertilisers, International Energy Agency
- [2] Plastics: the Facts 2018, Plastic Europe
- [3] Bodini G., Cacchi Pessani F., Presse e stampi per lo stampaggio delle materie plastiche, Negri Bossi, 1985
- [4] Menges G., Micheali W., Mohren P., How to make injection molds, Hanser Publishers, 2001
- [5] Unger P., Hot runner technology, Hanser Publishers, 2006
- [6] Chabot J. F., The development of plastics processing machinery and methods, Wiley-Interscience, 1992
- [7] <https://www.ptonline.com/articles/no-21---hot-runners>
- [8] Legnani G., Tiboni M., Adamini R., Meccanica degli azionamenti, Vol.1 – Azionamenti elettrici, Progetto Leonardo, 2006
- [9] Callegari M., Fanghella P., Pellicano F., Meccanica applicata alle macchine, CittàStudi, 2013
- [10] Shigley, Progetto e costruzione di macchine, McGraw-Hill, 2008