

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**SEDE DI VICENZA**

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

**TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE**

**STAMPAGGIO AD INIEZIONE CON SISTEMA  
IDRAULICO ED ELETTRICO.  
ANALISI DELLE DIVERSE CARATTERISTICHE**

RELATORE: PROF. GUIDO BERTI

LAUREANDA: GIULIA FAGGIONATO

ANNO ACCADEMICO 2013/2014



# INDICE

INTRODUZIONE .....	1
1. CAPITOLO 1 .....	3
Tecnologia dello stampaggio ad iniezione .....	3
1.1. Cenni storici.....	3
1.2. Cenni sui materiali polimerici.....	3
1.3. Descrizione di una generica pressa ad iniezione .....	6
1.3.1. Fasi operative.....	8
1.3.2. Panoramica sul tempo di ciclo .....	12
1.4. L'unità di plastificazione .....	12
1.4.1. Focus: la plastificazione e la vite .....	13
<i>Dimensionamento della vite</i> .....	14
<i>Usura della vite</i> .....	15
<i>Materiali utilizzati per la costruzione della vite</i> .....	16
1.4.2. Valvola di non ritorno ( <i>back-flow valve</i> ) .....	16
1.4.3. Ugello della pressa ( <i>machine nozzle</i> ).....	16
<i>Dimensionamento dell'ugello</i> .....	17
<i>Limiti tecnici dell'ugello</i> .....	17
1.5. Lo stampo.....	17
1.5.1. Canali di alimentazione .....	20
<i>Sistema di alimentazione tradizionale</i> .....	20
<i>Sistema di alimentazione a canali caldi</i> .....	22
1.5.2. Punti di iniezione ( <i>gate</i> ) .....	23
1.5.3. Sfiati .....	23
1.5.4. Materiale dello stampo .....	24
1.5.5. Sistema di raffreddamento.....	25
1.6. L'unità di chiusura.....	25
1.6.1. Estrattori .....	28
1.7. Le viti a ricircolo di sfere .....	29
1.8. I parametri costruttivi della pressa e classificazioni .....	29
1.9. Regolare una pressa .....	31
1.9.1. Focus: evoluzione della pressione.....	32

<i>Andamento della pressione locale</i> .....	35
<i>Determinare la pressione di iniezione</i> .....	36
1.9.2.Focus: il bilancio termico e il raffreddamento.....	37
<i>Il bilancio termico</i> .....	37
<i>Il raffreddamento</i> .....	39
2. CAPITOLO 2.....	42
Differenze tecniche tra una pressa ad azionamento idraulico e una ad azionamento elettrico.....	42
2.1. Il motore idraulico.....	42
2.1.1.Principio di funzionamento di un motore idraulico.....	44
2.1.2.Caratteristiche del fluido oleodinamico.....	45
2.1.3.Pressa idraulica.....	45
2.1.4.Vantaggi e svantaggi della pressa idraulica.....	46
2.2. Il motore elettrico.....	48
2.2.1.Pressa elettrica.....	51
2.2.2.Vantaggi e svantaggi della pressa elettrica.....	52
2.2.3.Il risparmio energetico.....	52
2.2.4.Riduzione del consumo di acqua e olio.....	53
2.2.5.Il punto di forza della pressa elettrica: la precisione.....	54
2.2.6.L'unità di termoregolazione.....	55
2.2.7.Riduzione del tempo di ciclo.....	56
2.2.8.Applicazioni.....	58
2.3. La pressa ibrida.....	59
2.4. I casi studio.....	60
2.4.1.La scelta di acquistare una pressa elettrica.....	60
2.4.2.La scelta di produrre una pressa elettrica (Italia).....	61
2.4.3.La scelta di produrre una pressa elettrica (Giappone).....	64
2.4.4.La scelta di non acquistare una pressa elettrica.....	65
3. CAPITOLO 3.....	67
Analisi economica di una pressa ad azionamento idraulico e una ad azionamento elettrico.....	67
3.1. Fattori di costo.....	67
3.1.1.Costo dello stampo.....	67

3.1.2. Costo dello stampaggio .....	68
3.1.3. Numero di impronte .....	68
3.1.4. Costo di investimento .....	69
3.1.5. Altri costi.....	69
3.2. Il caso studio: due presse italiane a confronto .....	70
3.2.1. Calcolo dei costi unitari.....	72
<i>Calcolo del costo della materia prima</i> .....	72
<i>Calcolo del costo di stampaggio</i> .....	73
<i>Calcolo del costo di investimento diretto</i> .....	73
<i>Calcolo del costo per la manutenzione</i> .....	75
<i>Calcolo del costo per il consumo di energia elettrica</i> .....	76
3.2.2. Calcolo del prezzo di vendita.....	77
3.3. Analisi dei costi .....	77
3.4. Analisi degli investimenti.....	79
3.4.1. Calcolo dei flussi di cassa prima e dopo le imposte e il VAN riferito al MARR.....	80
3.4.2. Valutazione degli investimenti in base al VAN, al pay-back period e considerazioni .....	81
3.4.3. Determinare la macchina idonea in base alla domanda di mercato .....	83
3.4.4. Determinare la macchina idonea in base al prezzo di vendita .....	84
 4. CAPITOLO 4 .....	 86
Elaborazione dei dati e delle differenze tecniche riscontrate.....	86
 CONCLUSIONI .....	 88
 BIBLIOGRAFIA.....	 89



# INTRODUZIONE

Lo stampaggio ad iniezione è uno dei processi di produzione industriale con materiali termoplastici più diffusi e permette di avere elevate produttività mantenendo i costi di esercizio bassi, purché la quantità prodotta riesca a giustificare l'investimento iniziale. Consente di produrre prodotti finiti, cioè prodotti che non hanno bisogno di lavorazioni aggiuntive e che presentano geometrie piuttosto complesse. Il materiale viene plastificato (fuso) e successivamente iniettato in stampi per la produzione di massa di oggetti di plastica. Bisogna prestare particolare attenzione alle pressioni esercitate durante il processo, ai tempi di ciclo e all'asportazione di calore nello stampo, che sono le variabili che determinano l'efficienza e i costi del macchinario.

L'evoluzione tecnologica degli ultimi anni ha permesso di passare da uno stampaggio con presse idrauliche, le quali sono azionate da un motore idraulico, all'utilizzo di nuove tipologie di macchine innovative: le presse ad azionamento elettrico. Queste ultime consentono di avere un'efficienza più elevata, garantiscono la massima precisione nello stampaggio e condizioni di ripetibilità del processo rendendolo più automatizzato, inoltre si verificano migliori condizioni di lavoro per l'operatore (le emissioni sonore sono minori) e non si verificano più problemi di inquinamento dovuto allo smaltimento dell'olio motore.

Il seguente progetto di tesi si occupa di valutare se è effettivamente conveniente abbandonare la tecnologia basata sull'oleodinamica per passare a quella elettrica.

Nel primo capitolo viene spiegato il processo di stampaggio ad iniezione di polimeri termoplastici, con una breve spiegazione dei materiali, delle fasi, delle variabili termodinamiche che entrano in gioco. Vengono inoltre esposti i punti di criticità di una generica pressa per l'iniezione; non si fa distinzione tra le varie tipologie di presse in quanto il principio di funzionamento del macchinario è lo stesso.

La seconda parte spiega il principio di funzionamento specifico di un motore idraulico e uno elettrico, elemento caratteristico che differenzia la pressa in idraulica ed elettrica. Inoltre si occupa di evidenziare le differenze tecniche tra le presse in esame valutandone vantaggi e svantaggi. Vengono riportate delle testimonianze di aziende produttrici di presse e di manufatti che spiegano le motivazioni investire o non investire in tecnologie di ultima generazione.

Nel terzo capitolo si svolge l'analisi dei costi dei due macchinari: si calcola, in primo luogo, tutti i costi relativi al processo di stampaggio (e tutti i costi ad esso associati), successivamente il prezzo di vendita ricavato dalle opportune formule per verificare le

differenze economiche tra la pressa idraulica ed elettrica messe a confronto. Infine, si effettua l'analisi degli investimenti per verificare quali tra i due macchinari è conveniente al variare del prezzo e della quantità venduta.

L'ultimo capitolo infine è dedicato al riassunto delle varie differenze tecniche ed economiche rilevate durante l'analisi.

# CAPITOLO 1

## Tecnologia dello stampaggio ad iniezione

### 1.1. Cenni storici

Nel 1872 Hyatt brevetta la prima pressa a iniezione nella quale il materiale caldo (celluloide, termoindurente) è plasticizzato in un cilindro caldo e successivamente iniettato con il moto dello stantuffo. L'introduzione di un secondo cilindro consente di separare la fase di riscaldamento da quella di iniezione: mentre il cilindro inietta il materiale nello stampo, una nuova carica può essere effettuata sul cilindro secondario, riducendo il tempo di ciclo.

Successivamente il cilindro di riscaldamento viene sostituito da un estrusore a vite, mentre rimane il cilindro di iniezione, tecnica ancora utilizzata ad oggi in materiali rinforzati in quanto riduce la rottura delle fibre.

Con la nascita, negli anni '30 – '40, dei polimeri termoplastici come poliammide (PA, commercialmente chiamato Nylon), polietilene (PE), polietilentereftalato (PET) e policarbonato (PC) si ha la necessità di sviluppare nuove macchine per la produzione di pezzi con questi nuovi materiali termoplastici. Viene ideata nei primi anni '50 la prima pressa con vite bifunzione (svolge sia la funzione di plastificare che di iniettare) ed è utilizzata ancora oggi.

Nel 1998 viene introdotta nel mercato la prima pressa totalmente elettrica, che in Giappone rimpiazza del tutto la pressa idraulica, mentre in Europa si ha un picco di richieste solo a partire dal 2008, quando viene introdotta la pressa full electric di grandi dimensioni.

### 1.2. Cenni sui materiali polimerici

Un polimero è una macromolecola costituita da un numero elevato di gruppi molecolari (unità ripetitive) che possono essere uguali o diversi e sono uniti a catena con ripetizioni dello stesso tipo di legame (covalente).

I polimeri si possono distinguere in:

- Tecnofibre (fibre sintetiche) create con molecole ottenute per sintesi. Vengono prodotte in serie da una materia prima a basso costo (solitamente derivati dal petrolio) e presentano delle buone caratteristiche meccaniche: le fibre sono resistenti e non vengono degradate da agenti esterni. Di contro non sono materiali

biodegradabili e possono portare allergie dovute all'utilizzo di particolari coloranti o a causa di reazioni chimiche (viscosa, lana di vetro);

- Polimeri termoindurenti. Classe di polimeri che una volta prodotti, non possono essere fusi senza andare incontro a degradazione chimica, cioè vengono carbonizzati (poliuretano);
- Polimeri termoplastici. Categoria di polimeri che possono essere plasticizzati più volte, ma ogni volta che subiscono un riscaldamento perdono una parte delle proprietà meccaniche. Grazie alla struttura interna lineare (e non reticolare), basta aumentare la temperatura per portare la materia ad uno stato viscoso e quindi poterla lavorare (polietilene, polipropilene, poliammide);
- Elastomeri. Particolare categoria di polimeri che ha proprietà fisiche simili a quelle del caucciù (gomma naturale). E' in grado di sopportare elevate deformazioni elastiche, cioè ritorna al suo stato iniziale anche se viene allungata di molto. Gli elastomeri vengono prodotti per vulcanizzazione, una tecnica che lega le catene di polimero utilizzando dei reattivi chimici. Ne consegue un materiali dalle proprietà termoindurenti, che non può essere riutilizzato dopo la prima lavorazione perché verrebbe carbonizzato.

In base alle caratteristiche descritte sopra, buona parte dello stampaggio ad iniezione si concentra sui polimeri termoplastici. Per evitare di perdere le proprietà fisiche specifiche del materiale, viene fornito al macchinario sotto forma di granulato che può contenere parti di materiale riciclato (proveniente da iniezioni precedenti), materiale vergine ed eventualmente pigmenti concentrati in un unico granulo (master) che danno colore al manufatto plastico da stampare.

Da un'intervista rilasciata dal responsabile ricerca e sviluppo Norbert Niessner di *Styrolution* alla rivista *Tecnoplast [1]*, afferma che le evoluzioni nel campo delle materie plastiche degli ultimi decenni hanno portato all'introduzione di materiali a base di stirene (polistirene, ABS) impattando significativamente sul settore delle materie plastiche in generale e hanno permesso di elevare gli standard in materia di sicurezza, sostenibilità e design. Partendo da prodotti di utilizzo quotidiano fino ad arrivare al settore automotive, l'utilizzo di plastiche a base di stirene garantisce la realizzazione di qualsiasi tipo di oggetto che, oltre a garantire un alto livello di sicurezza e leggerezza, ha un'ottima estetica. Inoltre, un contributo importante nell'introduzione dello stirene, riguarda la realizzazione di prototipi tramite la stampa in 3D, processo economicamente abbordabile se realizzato con questo tipo di polimeri.

Oltre a considerare il tipo di materiale polimerico da utilizzare nel processo, bisogna tener conto anche dei fenomeni reologici della sostanza quando è in stato fuso. La reologia dei polimeri studia il flusso e la deformazione del materiale, secondo la quale tutte le sostanze hanno proprietà intermedie tra i due comportamenti ideali estremi: da un lato quello solido che è perfettamente elastico, dall'altro quello fuso che è completamente viscoso.

Le leggi che governano i due casi ideali sono:

- Legge di Hooke che descrive il comportamento elastico di un materiale:  $\tau = G\gamma$
- Legge dei fluidi newtoniani che descrive l'andamento dello sforzo tangenziale proporzionale al gradiente di velocità:  $\tau = \frac{\partial \gamma}{\partial t} \mu = \dot{\gamma} \mu$ .

Dove  $\tau$  è lo sforzo tangenziale applicato [Pa], il modulo  $G$  è il modulo elastico tangenziale del materiale [Pa],  $\gamma$  corrisponde alla deformazione di taglio,  $\mu$  è la viscosità dinamica del materiale che determina la resistenza del materiale allo scorrimento [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ ], il differenziale  $\partial \gamma / \partial \tau = \dot{\gamma}$  è definito come velocità di deformazione, cioè il gradiente [ $\text{s}^{-1}$ ]. La legge che determina il comportamento viscoelastico dei materiali polimerici conserva la sua caratteristica lineare ed è pari alla somma dei due contributi degli sforzi tangenziali nei due casi ideali sopra citati:  $\tau = G\gamma + \dot{\gamma} \mu$ .

Le variabili reologiche introdotte ( $\gamma, \dot{\gamma}$ ) determinano lo stato di tensione all'interno del polimero ed anche il suo flusso all'interno dello stampo, quindi definiscono le caratteristiche

meccaniche del prodotto finito. Per garantire che il processo di stampaggio sia privo di scarti è necessario controllare accuratamente due proprietà termodinamiche: la pressione  $p$  e la temperatura  $T$ .

Dal diagramma p-T per una sostanza pura si vede come avviene il processo di fusione: all'aumentare della temperatura (a pressione costante) si ha un passaggio dallo stato solido allo stato liquido del materiale, passando per la zona di saturazione, dove solido e liquido coesistono in equilibrio e viene

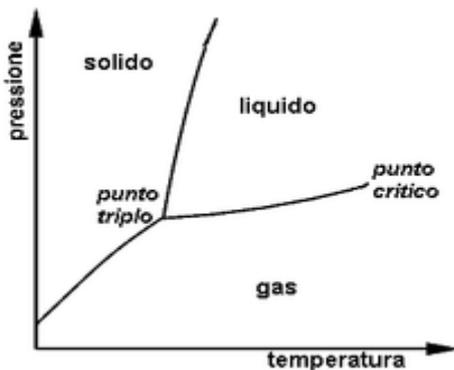


Figura 1- diagramma p-T per una sostanza pura

rappresentata da una linea poiché pressione e volume non variano durante il cambiamento di fase.

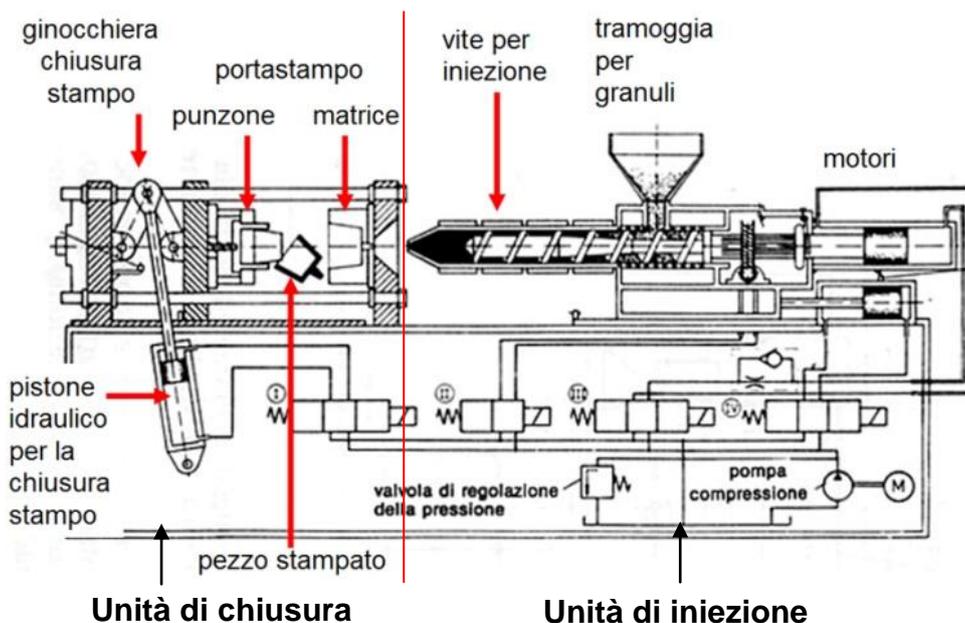
### 1.3. Descrizione di una generica pressa ad iniezione

La pressa per l'iniezione è suddivisa in due gruppi fondamentali: l'unità di iniezione e l'unità di chiusura. Le presse più largamente sviluppate ed utilizzate per la produzione sono di tipo orizzontale, la cui disposizione delle due zone rimane immutata nel tempo: il gruppo di iniezione alla destra dell'operatore, quello di chiusura alla sua sinistra.

Si definisce gruppo di iniezione l'insieme di componenti che contribuiscono alla fase di plastificazione del polimero. I principali sono: vite di plastificazione, tramoggia di alimentazione, miscelatore ed essiccatore del granulato polimerico, motore per l'iniezione.

La parte a sinistra del macchinario, il gruppo di chiusura, è costituito dai principali componenti: uno semistampo fisso collegato all'unità di iniezione, una parte mobile collegata alla chiusura a ginocchiera, le centraline per il raffreddamento, gli estrattori per l'espulsione del prodotto finito o eventuali manipolatori esterni, il motore per la regolazione del gruppo di chiusura.

Figura 2 - schema di una pressa idraulica



La macchina asservita ad un sistema di controllo che regola pressione e velocità nelle varie fasi del processo e, negli ultimi decenni, è diventato un componente fondamentale per aumentare l'efficienza delle nuove presse, riducendo gli scarti e aumentando la produttività.

Il sistema di stampaggio può essere identificato come una cella di lavoro per prodotti dimensionali e le sue funzioni sono:

1. Miscelazione (*blending*) : si mescolano insieme parti di polimero vergine (di primo uso), materiale riciclato, pigmenti colorati sotto forma di master (granulo di cera compatibile o polimero con concentrato di colore) e materiali ausiliari;
2. Essiccazione (*drying*) : deumidificazione del polimero miscelato per eliminare le particelle umide che creano difetti nel prodotto stampato;
3. Caricamento (*hoppering*) : mediante la tramoggia di alimentazione il materiale viene convogliato verso la vite per la plastificazione;
4. Regolazioni (*metering*) : regolazioni della velocità e della pressione del materiale all'interno della vite; senza questi controlli il risultato sarebbe pieno di imperfezioni o considerato pezzo scarto;
5. Plastificazione (*plastication*) : la vite per la plastificazione fluidifica il materiale per effetto delle resistenze elettriche e del riscaldamento dovuto all'attrito;
6. Iniezione (*injection*) : Il materiale viene iniettato dentro lo stampo per l'azione di un cilindro idraulico o elettrico;
7. Raffreddamento (*cooling*) : una centralina gestisce il raffreddamento dello stampo;
8. Estrazione (*ejection-clamping unit*) : il gruppo di chiusura esegue le operazioni di apertura dello stampo, estrazione del pezzo e chiusura della parte mobile dello stampo;
9. Unità di governo (*control unit*) : formato da microprocessori, sistemi di controllo in catena chiusa, CNC (controllo numerico);

Le esigenze qualitative e di riproducibilità dello stampaggio hanno permesso di comprendere che le operazioni di miscelazione, essiccazione e caricamento, una volta considerate come operazioni ausiliarie, sono notevolmente rilevanti per quanto riguarda la fluidità del materiale e le caratteristiche meccaniche del pezzo stampato.

La vite punzonante, l'elemento fondamentale della pressa per l'iniezione, ha il compito essenziale di fluidificare il polimero e iniettarlo all'interno dello stampo. Gli ultimi sviluppi tecnologici, permettono di effettuare controlli sempre più accurati in tutte le fasi della plastificazione, fino ad arrivare a programmare profili di velocità e pressione con precisione massima nelle macchine totalmente elettriche.

La maggior parte del tempo ciclo è occupata dalla fase del raffreddamento, tempo di rilevante importanza per ottenere un prodotto finito privo di difetti o che potrebbe addirittura risultare un pezzo di scarto. Attualmente si dà molta importanza alla progettazione del layout ottimale per i canali di raffreddamento, che consentono una corretta refrigerazione durante la fase di raffreddamento.

L'estrazione, può essere a caduta, manuale, con estrattori, oppure con l'utilizzo di manipolatori ausiliari che staccano il pezzo dallo stampo e lo posizionano sul nastro trasportatore (comunemente chiamati smaterozzatori).

### 1.3.1. Fasi operative

Le fasi del processo di iniezione possono essere schematizzate come segue:

- Chiusura dello stampo, chiusura dell'ugello e applicazione della forza di chiusura;
- Prelievo di materiale, rotazione vite, trasporto e plastificazione: dopo la miscelazione, il granulato passa dalla tramoggia al cilindro dove la vite provvede a plasticizzarlo e a farlo muovere verso la zona di iniezione che si trova nell'altra estremità della vite;
- La camera è a volume crescente e, man mano che il fuso entra, la vite arretra fino ad attivare un sensore che controlla il volume da iniettare;
- Arresto rotazione vite, apertura ugello e avanzamento del pistone: una volta terminato il processo di plastificazione la vite inverte la corsa per far avanzare il polimero fuso verso la zona di iniezione. In questa fase dello stampaggio, la vite funge da pistone perché muove il materiale mantenendo la pressione corretta. Una valvola di non ritorno posta in testa alla vite evita che il materiale fuso fluisca all'interno del cilindro di plastificazione;
- Iniezione del polimero all'interno dello stampo utilizzando una pressione di iniezione elevata (solitamente il valore di picco nella curva di pressione);
- Mantenimento a pressione minore della pressione di iniezione. Viene applicata una pressione anche in questa fase di processo per contrastare i ritiri dovuti al raffreddamento;
- Terminata la fase di raffreddamento si effettua l'espulsione del prodotto finito.

In maniera più sintetica, si possono suddividere in tre macro fasi:

fase 1. **Iniezione**: definita come riempimento parziale dello stampo.

fase 2. **Pressione di mantenimento, impaccamento e plastificazione**: riempimento completo dello stampo e raffreddamento del pezzo. È la fase di compattazione in cui si inietta la totalità del volume per realizzare il pezzo. Nel momento in cui avviene la chiusura del gate, la vite può iniziare a plastificare materiale per il ciclo successivo.

fase 3. **Estrazione**: apertura dello stampo ed espulsione del pezzo. Si può effettuare soltanto quando il pezzo raggiunge una rigidità sufficiente a non deformarsi per azione degli estrattori, per caduta o per azione dei manipolatori. Il pezzo è progettato

per rimanere ancorato alla parte mobile. È opportuno che l'apertura della pressa sia 3 volte la profondità dello stampo, in modo da avere lo spazio necessario per l'estrazione.

Per ottimizzare la produttività dello stampaggio bisogna definire e coordinare tre aspetti: la fisica del processo, le operazioni del gruppo di iniezione e le operazioni del gruppo di chiusura.

L'anello esterno rappresentato in figura 3 descrive la fisica del processo: chiarisce la disposizione, in una linea temporale, delle fasi sopra descritte. Sono riportate in breve qui sotto:

- **Riempimento** dello stampo, definito anche come riempimento totale delle cavità stampo che termina idealmente al momento esatto del completamento della cavità per evitare un innalzamento incontrollato della pressione. Il controllo della fase di riempimento è di tipo volumetrico: la pressa regola la velocità di avanzamento della vite e quindi la portata di massa.
- **Compensazione o pressurizzazione:** fase di crescita rapida della pressione all'interno della cavità, ottenuta alla fine del flusso. Il controllo nella durante il processo di compensazione è a livello di pressione. Nello stesso istante in cui parte la prima pressurizzazione inizia anche la fase di **raffreddamento**, si dice anche che il raffreddamento parte al tempo zero per la prima sezione a essere riempita. È attuata grazie alla circolazione di fluido refrigerante (solitamente acqua) che asporta calore dal materiale iniettato nello stampo per velocizzare il tempo di solidificazione. Per avere un'asportazione omogenea di calore in tutto lo stampo bisogna prestare particolare attenzione al posizionamento dei punti di iniezione, alla realizzazione dei canali di raffreddamento, alla grandezza del manufatto e dai diversi tempi di raffreddamento nelle varie zone dello stampo (o di parti di esso).
- **Mantenimento** in pressione per introdurre altro materiale nello stampo per compensare le contrazioni termiche dovute al raffreddamento, se non viene compensato si generano risucchi e vuoti interni.

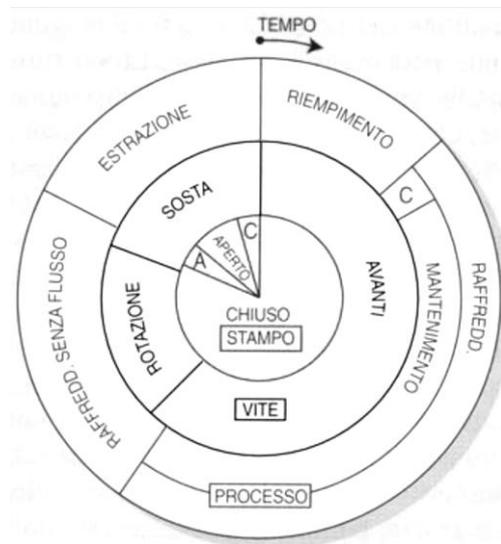


Figura 3 - i tre aspetti del processo [2]

- **Raffreddamento senza deflusso o raffreddamento sigillato.** È separato dal raffreddamento con deflusso in quanto avviene successivamente alla sigillatura del gate (solidificazione); durante questa fase non può esserci alcun flusso di materiale. In questa fase la densità del polimero aumenta per contrazione termica rilasciando gradualmente la pressione accumulata nella compensazione. Il volume del materiale che occupa lo stampo non varia finché la pressione permane.
- **Estrazione.** Quando il pezzo raggiunge una temperatura sufficiente a ottenere una rigidità strutturale tale da impedire deformazioni durante l'estrazione (definita appunto temperatura di estrazione) si può dire che è raffreddato, quindi pronto per essere estratto dallo stampo. Si deve notare che anche la pressione interna deve essere azzerata, perché potrebbe contrastare l'estrazione del manufatto. Una volta espulso dal semistampo, il prodotto finisce il raffreddamento fino a raggiungere la temperatura ambiente utilizzando l'aria, solo in casi estremi si effettua un secondo raffreddamento in acqua.

L'anello intermedio descrive il movimento del gruppo di iniezione, in particolare il movimento della vite punzonante, che viene eseguito in contemporanea al processo fisico.

- **Vite avanti.** Grazie alla valvola di non ritorno posizionata sul puntale della vite, consente l'avanzamento del flusso lungo la direzione di iniezione senza problemi di reflusso. In questa fase di processo la vite agisce come un pistone, imprimendo una pressione di iniezione al materiale crea una forza tale da costringerlo a passare per l'ugello e, infine, a riempire tutte le zone dello stampo. Il termine della fase avanzamento della vite è determinato in base alle dimensioni di iniezione e corrisponde ad un istante prima del mantenimento.
- **Rotazione.** Il processo fisico corrisponde al raffreddamento senza deflusso il quale, grazie alla solidificazione del gate, blocca il flusso di materiale nello stampo e consente alla vite di cominciare una nuova plastificazione per l'iniezione successiva. In questa fase la vite svolge indipendentemente un'altra operazione rispetto a quella di processo. La plastificazione di nuovo materiale deve concludersi un istante prima dell'apertura dello stampo, per evitare che il materiale plastificato fuoriesca dall'ugello al posto di accumularsi sul fronte della vite. Questa condizione è necessaria sulle presse che non hanno la capacità di effettuare movimenti sovrapposti. Le ultime, invece, devono essere necessariamente ad azionamento elettrico e dotate di particolari ugelli a valvola. La sovrapposizione dei movimenti permette di ridurre notevolmente il tempo di ciclo, andando a incidere positivamente sulla produttività.

- **Sosta.** Di norma la vite si arresta prima della fine del ciclo di produzione, se ciò non accadesse si andrebbe ad allungare il tempo di ciclo, incidendo negativamente sulla produttività. Quando la vite ha ultimato la plastificazione del polimero rimane in sosta finché il ciclo di produzione non è completo.

L'anello interno raffigura il movimento dell'unità di chiusura, azionato per mezzo di ginocchiere o pistoni. Viene eseguito in contemporanea al processo fisico e al movimento dell'unità di iniezione.

- Per la quasi totalità del tempo di ciclo lo stampo rimane **chiuso**, in particolare dalla fase di riempimento fino al totale raffreddamento del pezzo, cioè quando raggiunge una temperatura tale da non deformarsi per l'azione degli estrattori.
- Stampo **aperto**. Quando la stampata ultima il raffreddamento lo stampo si apre per permettere l'estrazione di quest'ultima grazie a particolari estrattori installati nello stampo, o per mezzo di macchinari ausiliari, o ancora manualmente.
- Una volta effettuata l'estrazione, lo stampo viene **chiuso** per consentire l'iniezione del successivo ciclo di produzione.

Il gruppo di chiusura ha il compito fondamentale di contrastare le forze di apertura generate dalle pressioni di riempimento e di compattazione. Per questo motivo, grazie all'utilizzo di motori e componenti meccanici che aumentano la coppia, si generano delle forze di serraggio che si oppongono alla pressione presente nel polimero che a sua volta è generata dalla vite punzonante.

Nel mercato sono presenti varie tipologie di gruppi di chiusura: a partire dai metodi diretti come pistoni idraulici, a metodi indiretti quali sistemi a ginocchiera a 4 e 5 punti. Sono preferibili i sistemi di chiusura a ginocchiera per motivi di ingombro, risparmio energetico, rumorosità, manutenzione e precisione.

Ai fini del processo fisico, i tempi di apertura e chiusura sono considerati tempi morti, mentre è di notevole importanza il controllo della velocità di chiusura e la modalità di chiusura dello stampo. Questi parametri determinano la ripetibilità del processo produttivo: una modalità di chiusura non corretta per il tipo di geometria da stampare può portare a difficoltà nell'estrazione o il disallineamento dei tasselli dello stampo; la velocità di chiusura deve essere rallentata prima della sua conclusione per permettere il funzionamento delle sicurezze contro lo schiacciamento dei pezzi non estratti, ma bisogna considerare anche che eventuali tempi lunghi di questa fase possono contribuire ad un raffreddamento non desiderato dello stampo, andando ad intaccare sulle proprietà meccaniche del prodotto finito. Un'ultima considerazione da fare sulla velocità di chiusura riguarda l'imprecisione, la quale

porta ad una sovrapposizione non perfetta delle operazioni di apertura/chiusura rispetto al processo fisico, rischiando di generare scarto.

### 1.3.2. Panoramica sul tempo di ciclo

Dalla figura 4 si nota come il tempo totale di ciclo sia la somma dei tempi delle singole fasi ed inoltre, la maggior parte del tempo è occupata dal mantenimento in pressione (post-pressione) e dal raffreddamento del pezzo stampato. Nello stampaggio progettato, il tempo di raffreddamento può essere parzialmente recuperato dal momento in cui si verifica la fase di raffreddamento sigillata: la prima solidificazione del materiale nell'ugello consente di tenere intrappolato il fluido da raffreddare dentro lo stampo, così la vite può procedere con la

rotazione e la preparazione della carica successiva.

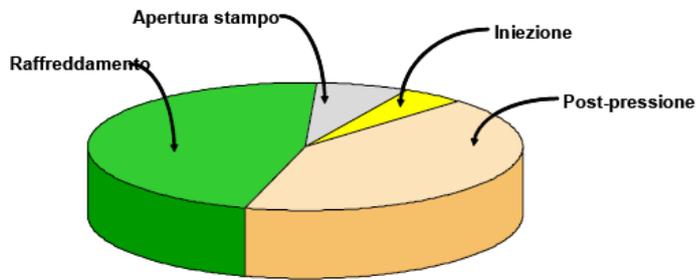


Figura 4 - tempo totale di un ciclo [3]

Per ottimizzare i tempi di ciclo e quindi avere un'elevata produttività bisogna controllare le variabili di processo che vanno a ridurre i tempi delle singole operazioni (tempi di mantenimento e raffreddamento), problemi che saranno analizzati in seguito.

### 1.4. L'unità di plastificazione

Come prima cosa svolge l'operazione di miscelazione del polimero vergine con il materiale riciclato (ed eventuale granuli con pigmenti colorati concentrati) per creare la miscela giusta da caricare nel cilindro di plastificazione. Questa operazione primaria viene eseguita dal **miscelatore/essiccatore**, costituito da un unico componente che asporta anche le particelle di umidità presenti nel granulato. Se non viene effettuata l'essiccazione il prodotto stampato risulterà con difetti di porosità o bolle all'interno del pezzo stesso, difetti che vanno ad intaccare anche sulle proprietà meccaniche, oltre all'estetica del prodotto finito.

Il granulato miscelato viene caricato nel cilindro di plastificazione tramite la tramoggia, componente a forma di imbuto che fa confluire il materiale in un unico punto per effetto gravitazionale.

Successivamente si ha la fase di plastificazione del polimero, effettuata per mezzo del riscaldamento del materiale grazie alle fasce termoelettriche presenti sul cilindro e per attrito; infine l'iniezione all'interno dello stampo.

#### 1.4.1. Focus: la plastificazione e la vite

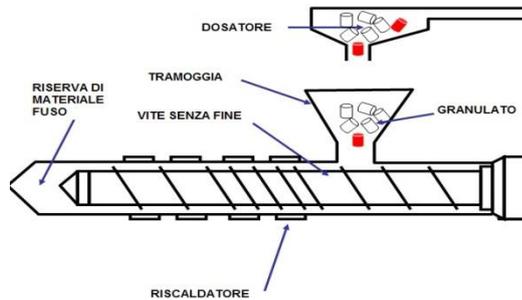


Figura 5 - struttura del gruppo di plastificazione

La parte fondamentale della fase di plastificazione è la vite punzonante posta all'interno del cilindro di plastificazione. Il cilindro è costituito da fasce riscaldanti elettriche che contribuiscono al riscaldamento e mantenimento in temperatura specifica per ogni tipo di polimero: al suo interno raccoglie il materiale da plastificare e la vite che ruota avanti e indietro sul cilindro. Grazie alla particolare filettatura di cui è dotata la vite, il materiale viene riscaldato per attrito (riscaldamento autogeno) e contemporaneamente fatto avanzare lungo il cilindro verso la zona di iniezione.

Lungo la direzione del flusso del materiale la vite si suddivide in tre zone:

- Zona di alimentazione (comprende il 50% della vite);
- Zona di compressione (comprende il 25% della vite);
- Zona di dosaggio (comprende il 25% della vite).



Figura 6 - zone di una vite a barriera

Il diametro esterno della vite rimane costante in tutta la sua lunghezza, mentre varia il diametro di nocciolo interno: nella zona di alimentazione ha un valore minimo per accogliere grande volume di granulato, nella parte del dosaggio ha un diametro massimo a causa della riduzione del volume di polimero. Nella parte intermedia si ha un aumento lineare per raccordare le due zone esterne. Nella figura 6 è riportata una particolare vite a barriera, molto utilizzata negli ultimi anni. La "barriera" posta all'inizio della zona di compressione separa il materiale fuso da quello ancora da omogeneizzare che, risultando meno fluido, è più soggetto alle azioni di taglio necessaria alla completa fusione. Questa soluzione particolare va a incidere in maniera positiva sul tempo di plastificazione.

## Dimensionamento della vite

Poiché il passo della vite (distanza tra una filettatura e l'altra) è pari al diametro della vite allora possiamo definire la lunghezza caratteristica che sarà pari a rapporto  $L/D$  con valori tipici per le presse a iniezione che variano tra i 20 e i 25. La lunghezza specifica per le varie zone è pari a:  $0.5 - 0.6L$  per la zona di alimentazione,  $0.2 - 0.25L$  per la zona di compressione,  $0.2 - 0.25L$  nella zona finale di dosaggio.

Un parametro fondamentale per il dimensionamento della vite è il rapporto di compressione "compression ratio" pari al rapporto tra la zona di alimentazione e quella di dosaggio, il quale deve rimanere entro un range di valori tra 2 e 5 e varia a seconda della viscosità caratteristica del materiale: raggiunge valori minimi per materiali semicristallini e massimi per i materiali amorfi.

Le velocità massime di avanzamento del polimero entro il cilindro di plastificazione possono raggiungere i 0,5 m/s per i materiali amorfi, mentre i semicristallini arrivano ad un massimo di 0,7 m/s.

I valori scritti sopra sono determinati per l'ottimizzazione del tempo di plastificazione, in quanto la velocità di avanzamento è un parametro fondamentale per garantire un tempo ciclo di produzione minimo. Ad ogni stampo è associato un volume da plastificare, fattore essenziale del processo.

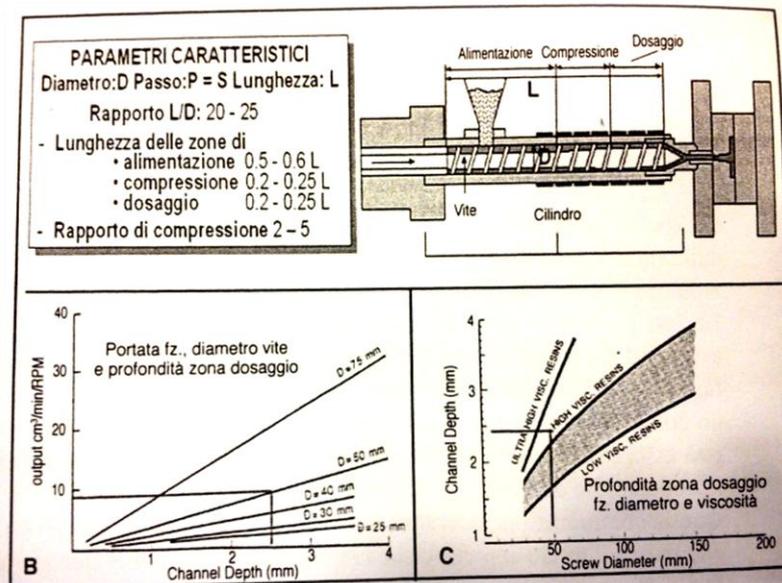


Figura 7 - previsione della portata di massa plastificata [2]

Dalla figura 7B si vede come la portata di massa che è possibile plastificare varia linearmente con il diametro della vite e la profondità della zona di dosaggio, scelta in base alle caratteristiche viscosive del polimero. È possibile determinare la velocità massima della vite con la relazione:

$$v = D \times \text{profondità di dosaggio} \times \text{rpm}/60 \times 1000 \quad [2] \quad (\text{dove rpm sono le rotazioni per minuto})$$

È necessario confrontare la velocità di avanzamento calcolata con i limiti di velocità periferiche stabiliti prima, che ricordiamo essere pari a 0,5 m/s per i materiali amorfi e 0,7

m/s per i semicristallini. Se la vite risulta supportare velocità maggiori è necessario ridurle per rispettare i limiti tecnici, o eventualmente scegliere una tipologia di vite idonea.

Successivamente si calcola il volume di dosaggio da iniettare che deve essere compreso tra il 20% e l'80% della capacità massima. Ci si aspetta che, se si lavora nel limite inferiore della capacità di plastificazione, potranno essere presenti dei fenomeni di degrado dovuti a una permanenza eccessiva del fuso nel cilindro.

### *Usura della vite*

Tutti i componenti che servono a plastificare il polimero sono soggetti ad usura, prodotta da più fattori sovrapposti: usura meccanica, abrasione e corrosione (lavorazione di termoplastici speciali).

L'usura meccanica è data da una particella più dura che va ad intaccare il materiale più morbido del corpo base e la scalfisce. Solitamente avviene lungo tutta la zona di plastificazione: sia dove il materiale è ancora granulare, sia dove è allo stato fuso. È necessario allora valutare qual è il materiale idoneo per la costruzione della vite in base alla fase di plastificazione specifica.

La corrosione è nella maggior parte dei casi, un attacco combinato chimico e meccanico. Un elemento frequente di corrosione è l'acqua: se il miscelato in prima fase non viene essiccato correttamente, le particelle d'acqua che si presentano dentro il materiale fuso combinato all'ossigeno, portano a fenomeni corrosivi. I fenomeni corrosivi si presentano soprattutto nella fase di iniezione del polimero e nelle barriere. Per ridurre i fenomeni di usura legati alla corrosione bisogna effettuare una tempra agli utensili per la plastificazione o una finitura superficiale.

I fattori che influenzano l'usura della vite sono:

- Velocità di rotazione, contropressione, temperature, tempo di sosta del materiale;
- Tipo di carica (fibre di vetro, carbonio, cariche minerali);
- Percentuale di carica;
- Additivi (materiale ignifugo, colorante);
- Geometria della vite.

Come evidenziato nell'ultimo punto, anche la geometria della vite incide sull'usura, la quale deve mantenere rapporti di compressione tra 2 e 5 per rispettare i limiti tecnici (compression ratio). È preferibile scegliere viti che hanno un valore del rapporto di compressione alto per polimeri che presentano difficoltà di fluidificazione (polimeri cristallini e semicristallini),

mentre si scelgono viti con rapporti minimi in presenza di materiali sensibili allo snervamento (PVC).

#### *Materiali utilizzati per la costruzione della vite*

È fondamentale la scelta del gruppo di plastificazione idonea in base al processo di stampaggio da eseguire in quanto, una scelta corretta, riduce i fenomeni di usura e aumenta le prestazioni. La scelta del materiale per la costruzione della vite deve ricadere sugli acciai, in particolare: acciai da nitrurazione, acciai da cementazione, acciai al cromo e acciai inox.

#### 1.4.2. Valvola di non ritorno (*back-flow valve*)

È un particolare componente posto in testa alla vite, indispensabile per consentire lo spostamento alla stessa in direzioni opposte (vite avanti, vite indietro) ed evita il reflusso del polimero durante l'iniezione. Consiste in una tenuta meccanica realizzata mediante un collare mobile che si accoppia con un corrispondente profilo conico della vite.

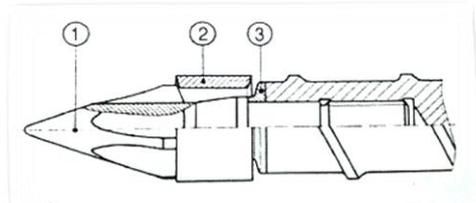


Figura 8 - valvola di non ritorno [2]

Nella fase di plastificazione l'anello 2 viene spinto in avanti fino al puntale dal materiale fuso, che così ha lo spazio per fluire nella camera di accumulo fino all'iniezione successiva. Successivamente l'anello retrocede fino ad andare in battuta sulla ghiera 3, la quale realizza una tenuta ermetica che impedisce al materiale di ritornare nella camera di plastificazione (effetto di non ritorno). Se l'anello non è abbastanza reattivo, quindi non si muove con necessaria rapidità e regolarità, oppure non riesce ad andare completamente in battuta, le condizioni di iniezione vengono variate. Le nuove valvole di non ritorno hanno una contro rotazione della vite che sigilla l'anello, evitando il reflusso (soluzione Sumitomo) [2].

#### 1.4.3. Ugello della pressa (*machine nozzle*)

È il componente che collega il gruppo di plastificazione allo semistampo fisso: più precisamente la collega alla carota situata nello stampo. L'utilizzo dell'ugello consente di plastificare il materiale all'interno del cilindro anche quando lo stampo è aperto (situazione con ginocchiera piegata). Se non ci fosse l'otturatore, il fuso uscirebbe dalla zona di dosaggio senza lo stampo in posizione corretta. I gocciolamenti, cioè le perdite di polimero fuso, costituiscono un problema per quanto riguarda la qualità del manufatto: tra un ciclo e l'altro si raffreddano con la conseguenza che il materiale può finire nello stampo causando

difettosità nella stampata successiva. Solitamente l'ugello è avvitato attorno al cilindro di plastificazione e viene staccato dallo stampo ad ogni ciclo per evitare il raffreddamento o un eccessivo riscaldamento della parte fissa dello semistampo.

### *Dimensionamento dell'ugello*

È necessario dimensionare in maniera corretta l'ugello al fine di non avere problemi durante il ciclo di stampaggio. Gli elementi da dimensionare sono il diametro dell'ugello e la lunghezza. Ad ogni cambio dello stampo si dovrebbe sostituire l'otturatore, ma poiché nella realtà questo non avviene, è importante almeno regolare il foro di uscita del flusso di polimero il quale deve essere ridotto rispetto alla carota dello stampo: si calcola almeno 0,5-1 mm in meno del diametro finale della carota per evitare che si formino dei sottosquadri di estrazione. Può capitare che una riduzione del foro dell'ugello riduca notevolmente la portata di massa che si può iniettare nello stampo, utilizzando tempi di riempimento più lunghi che penalizzano il ciclo e influenzano la qualità delle linee di saldatura dei flussi.

Nelle presse tradizionali, si fornivano ugelli con lunghezza  $L = 3D$ . Studi successivi hanno dimostrato la relazione che lega le cadute di pressione (le quali devono essere minime) alla lunghezza dell'ugello: se consideriamo un ugello con lunghezza  $3D$  avrà una caduta di pressione tre volte rispetto a quella di un ugello che ha  $L = D$ .

### *Limiti tecnici dell'ugello*

L'ugello presenta alcune limitazioni che possono ridurre le prestazioni dell'intero ciclo di stampaggio:

- Usura delle parti in movimento;
- Presenza di zone di ristagno che portano alla degradazione del materiale;
- Possibili restrizioni del flusso;
- Non è possibile utilizzare ugelli a otturazione in materiali poco termostabili o con specifiche severe; è necessario optare per un ugello senza chiusura, il quale può effettuare la fase di plastificazione solo se lo stampo è in posizione chiusa.

## 1.5. Lo stampo

È una matrice che viene appositamente costruita per la realizzazione di un pezzo con una determinata forma. Lo stampo è costituito da due gusci, chiamati semistampi. Il semistampo

mobile (maschio) trasla insieme alla ginocchiera posta nel gruppo di chiusura; la parte fissa (femmina) rimane ancorata nella zona di plastificazione.

Lo stampo è uno dei componenti indispensabili per il processo di iniezione, in quanto al suo interno avvengono le seguenti fasi:

- Determinare della forma dell'oggetto da stampare;
- Propagare il fuso dal cilindro di plastificazione all'interno dello stesso tramite i canali di alimentazione;
- Raffreddare del manufatto finché non si è solidificato;
- Espellere l'oggetto stampato senza provocare deformazioni e rotture.

Una caratteristica molto importante che determina l'efficienza del macchinario è la precisione dello stampo: esso non deve richiedere continui aggiustamenti ai parametri del processo, non deve prevedere lunghi tempi di manutenzione, inoltre l'asportazione del calore per il raffreddamento deve essere corretta in modo da ottimizzare il tempo di ciclo. Se non vengono rispettate le condizioni per la massima precisione dello stampaggio è indispensabile riprogettare lo stampo in modo da avere il massimo della riproducibilità nel processo di stampaggio, evitando quindi che il macchinario stia fermo risultano improduttivo.

È di fondamentale importanza evidenziare che lo stampo, rispetto a tutti gli altri componenti che costituiscono la pressa, ha un costo di acquisto elevato che risulta essere pari quasi al costo del macchinario stesso. Diversi fattori incidono sugli elevati costi di realizzazione di uno stampo:

- La geometria: più complessa è la struttura geometrica del manufatto, più è elevato il costo dello stampo;
- Numero di cavità (fig 9.b.1): corrisponde al numero di pezzi che si possono stampare in ogni ciclo, cioè la quantità di figure presenti in uno stampo. I costi di progettazione aumentano all'aumentare del numero di cavità, ma aumenta la produttività della macchina, aumentando anche il profitto;
- Sottosquadri: vanno evitati gli angoli di 90° o più che rendono indivisibile il manufatto dallo stampo;
- Tipo e posizione dei canali di alimentazione: nello schema a canali caldi diminuisce il tempo di propagazione del fuso nello stampo, si riduce il tempo di raffreddamento, riducendo di conseguenza il tempo di un ciclo, ma con un notevole aumento il costo dello stampo a causa della struttura geometrica più complessa; una schema a canali

freddi richiede tempi di ciclo leggermente più lunghi, ma ha costi di produzione minori;

- Materiale utilizzato: per sfruttare al meglio le caratteristiche meccaniche e ridurre l'usura, gli stampi vengono realizzati in acciaio bonificato o temprato;
- Tipo e posizione degli estrattori (fig 9.b.3);
- Tipo e posizione dei canali di raffreddamento (fig 9.b.2);
- Tipo e posizione dei dispositivi di sfiato;
- Grado di finitura superficiale che si vuole ottenere;
- Superfici di separazione;

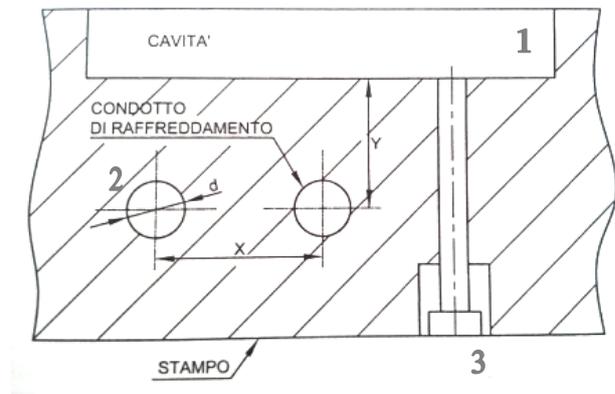


Figura 9.a - due semistampi di un flacone (stampo ad una sola figura)

Figura 9.b - profilo di uno stampo [4]

Come definito prima, il numero di cavità è il numero di figure presenti in uno stampo: usare stampi con cavità multiple incrementa la produttività della pressa, a discapito della capacità di plasticizzazione dell'unità di plastificazione. Un maggiore numero di cavità comporta un maggiore volume che il cilindro di plastificazione deve fondere. Non esiste un criterio matematico per determinare il numero di cavità di uno stampo, in quanto dipende da diversi fattori, tra i quali il più importante è la geometria del pezzo da stampare. In ogni caso conviene sempre, dove possibile, avere due o più figure per ogni stampo, in modo da avere un ritorno economico più rapido. La figura 9.a rappresenta il caso limite di una geometria ampia e complessa che costringe lo stampo ad avere una sola figura.

La definizione di uno stampo avviene in base alle scelte costruttive fatte dal progettista, che dovrà prendere decisioni in merito ad alcuni parametri che influenzano i costi di produzione dello stampo: numero di sottosquadri, superficie di separazione tra i semistampi, numero di

figure, tipo e posizione dei canali di alimentazione, tipo e posizione dei canali di iniezione, tipo e posizione degli estrattori, tipo e posizione dei dispositivi di sfiato, materiale dello stampo.

### 1.5.1. Canali di alimentazione

Ogni stampo ha la necessità di avere dei canali di alimentazione per trasportare il fuso dall'iniettore, posto al centro dello stampo, e le figure posizionate all'estremità. È costituito dall'insieme di canali che convogliano il polimero fuso nelle cavità da riempire.

La scelta della struttura delle canalizzazioni influenza in modo sostanziale i costi di costruzione sia dello stampo che dello stampaggio ed ha incidenti effetti sulla qualità dei prodotti. Un sistema di alimentazione non idoneo può portare a prodotti finiti difettosi, in quanto non vengono soddisfatti i criteri di omogeneità delle variabili di campo, come ad esempio la temperatura: possono verificarsi condizioni di degradamento del materiale dovuto a temperature troppo elevate, oppure l'estremo opposto in cui le cavità non sono completamente riempite a causa dei sistemi di alimentazione che provocano un raffreddamento anticipato del polimero, bloccandone il flusso.

Le migliori geometrie sono sempre a sezione circolare che rendono minimo lo spreco di materiale a parità di perdite di pressione, inoltre sono prive di "spigoli vivi" che aumenterebbero il rischio di degradazione del polimero fuso; in commercio sono presenti anche altre geometrie per canali particolari: a sezione rettangolare, trapezoidale o semicircolare.

Per ridurre i tempi di produzione si può utilizzare un sistema di alimentazione a canali caldi, che diminuisce il tempo di ciclo ma aumenta i costi di progettazione e produzione dello stampo, in alternativa al sistema di alimentazione tradizionale a canali freddi.

#### *Sistema di alimentazione tradizionale*

Sono posizionati nella parte fissa dello stampo, in modo consentire facilmente l'espulsione della materozza quando si ha l'estrazione del manufatto. La struttura è costituita da un ugello caldo che collega lo stampo all'unità di plastificazione e da tre principali canali freddi:

1. la carota (*sprue*);
2. i canali di alimentazione (*runner*);

### 3. i canali di iniezione (*gate*).

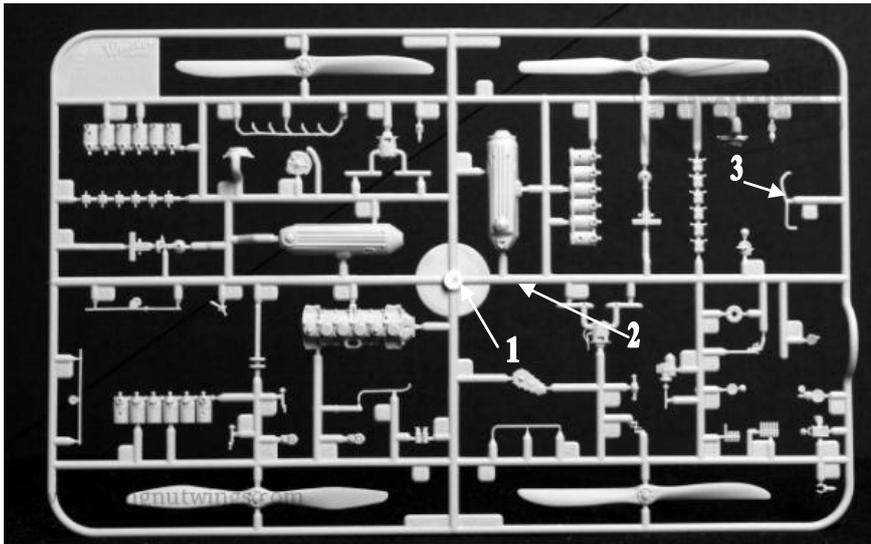


Figura 10 - schema di una materozza di uno stampo multi-impronta

L'insieme dei tre elementi (*sprue*, *runner* e *gate*) forma la materozza; inoltre i canali di alimentazione si suddividono in primari e secondari: i primari sono direttamente collegati alla carota, mentre i secondari sono i rami che si collegano ai canali primari.

Il sistema a canali tradizionali è lavorato direttamente sullo stampo di cui assume la stessa temperatura media. Il materiale solidifica nei canali ad ogni iniezione e va estratto alla fine di ogni ciclo, poi viene riciclato e riutilizzato per le successive miscele.

Nel caso di stampi multi-impronta i canali devono essere in grado di distribuire in maniera uniforme il materiale fuso in tutte le zone dello stampo in modo simultaneo (per non avere tempi di raffreddamento diversi), ed inoltre devono garantire minime cadute di pressione in tutte le cavità. È di fondamentale importanza che i canali vengano progettati in modo da non raffreddarsi fino alla temperatura di non flusso prima che sia terminato il tempo di compattazione specifico del polimero, cioè i canali non si devono raffreddare finché non è stato iniettato tutto il volume di materiale fuso (prima iniezione e compattazione). Intuitivamente si può pensare di aumentare il diametro dei canali per ridurre i problemi di raffreddamento precoce ma, l'aumento dell'area del canale porta ad una maggiore necessità di plastificazione e un  $\Delta T$  di temperatura da asportare maggiore, penalizzando il ciclo del processo.

Data la struttura interna meno complessa dei canali tradizionali, i costi di degli stampi risultano minori, fattore non trascurabile dato che lo stampo costa indicativamente come il macchinario. Di contro, questo sistema di alimentazione penalizza leggermente la produttività, perché i tempi di ciclo non si possono ridurre; inoltre l'utilizzo di materozza aumenta la quantità di materiale utilizzato per ogni singola stampata, incidendo sui costi delle materie prime.

### *Sistema di alimentazione a canali caldi*

Il processo in a canali caldi viene definito senza materozza, nel quale il trasferimento del polimero fuso dal cilindro di plastificazione alle cavità avviene tramite passaggi mantenuti caldi che consentono di tenere fuso il polimero. I canali sono contenuti in un apposito blocco, il *manifold*, ovvero il distributore e sono collegati ai punti di iniezione tramite degli ugelli caldi. È tenuto separato dal resto dello stampo riducendo il più possibile le aree di contatto perché deve operare a temperature uguali a quelle del polimero fuso (tra i 150 °C e i 300 °C).

I primi sistemi di alimentazione a canali caldi ad essere stati progettati sono definiti canali isolati, i quali vengono creati grazie ad uno strato di materiale polimerico che solidifica e permette al suo interno il passaggio dello stesso allo stato fuso. Per creare la situazione a canali isolati è necessario avere dei canali sufficientemente grandi in modo tale da mantenere delle temperature elevate al centro e garantire il flusso di polimero.

È necessario dimensionare i canali caldi non solo in funzione del polimero e della temperatura, ma anche della qualità iniettata ad ogni ciclo e della frequenza di stampaggio. I sistemi a canali isolati sono fortemente influenzati dal tempo e dalla frequenza di ciclo in quanto, se si verifica un'interruzione durante il ciclo, si ha il raffreddamento completo del canale, che va a incidere sulle condizioni di flusso. Per questo motivo i sistemi a canali caldi sono sconsigliati per processi di stampaggio con tempi di ciclo lunghi e, in ogni modo, sono poco utilizzati perché non ci sono le condizioni di continuità del processo: un'interruzione di ciclo modifica le condizioni della stampata successiva, quindi non si ha un controllo termico dello stampaggio.

Esistono dei sistemi senza materozza più efficienti, nei quali viene applicato un riscaldamento direttamente sul blocco esterno della manifold mentre il resto dello stampo viene isolato e tenuto a temperature inferiori rispetto agli stampi con canali progettati in maniera differente. Questi impianti vengono definiti a canali caldi veri e propri. Sono molto più popolari dei canali descritti in precedenza ed inoltre non presentano i problemi di ripetibilità del ciclo di produzione, perché il controllo termico è migliore nelle interruzioni durante lo stampaggio. Anche i sistemi a canali caldi presentano delle difficoltà, le quali sono ancora oggi oggetto di studio al fine di ottimizzare le iniezioni: problemi nell'isolamento corretto della manifold dallo stampo, senza penalizzare il tempo di ciclo; rapido riscaldamento della manifold con buona omogeneità nella temperatura in tutte le zone dello stampo; possibilità di avere delle zone di ristagno nella manifold con un conseguente degradamento del fuso; problemi di gocciolamenti e raffreddamenti prematuri nella zona di iniezione; possibili problemi di manutenzione e di usura dello stampo.

Rispetto a quanto detto sui canali tradizionali, questi sistemi sono più convenienti dal punto di vista pratico: dovendo asportare calore solo in un'area ridotta dello stampo (manifold) si riducono notevolmente i tempi di raffreddamento, che incidono positivamente sul tempo di ciclo e quindi anche sulla produttività; inoltre il mantenimento del materiale allo stato fuso, ciclo dopo ciclo riduce il consumo di polimero (grazie all'assenza della materozza) e richiede meno energia alla pressa perché sono necessarie minori pressioni di iniezione. L'aspetto negativo di questi stampi è la struttura molto complessa, che ha un impatto pesante sul costo di acquisto dello stesso e, spesso, un'elevata produzione non riesce ancora a giustificare il costo di investimento così elevato.

### 1.5.2. Punti di iniezione (gate)

I punti di iniezione hanno la duplice funzione di controllare il flusso in entrata del polimero nella cavità e di consentire un facile distacco del materiale durante l'estrazione.

Non esiste una regola matematica per determinare quanti punti di iniezione sono necessari per ogni figura, bensì una regola empirica: si parte con un unico gate, soluzione migliore in quanto si minimizza il numero di canali, aggiungendone altri eventualmente quando si verificano problemi di incompleto riempimento della cavità.

Se la figura ha uno spessore variabile, conviene posizionare il punto di iniezione nella zona a spessore più elevato. Di norma comunque il progettista utilizza software per determinare il posizionamento ottimale del gate.

Nel caso di sistemi a canali caldi, la struttura risulta incompleta: bisogna posizionare un ulteriore ugello con otturatore nel punto di iniezione per evitare il riempimento parziale della cavità (il polimero plastificato tende a rimanere nel canale allo stato fuso).

### 1.5.3. Sfiati

Un stampo ben progettato include dei canali di sfiato che hanno la funzione di espellere inclusioni di gas che potrebbero risiedere all'interno del polimero fuso.

Per quanto riguarda gli sfiati passivi, basta inserire un sistema di canalizzazione che espelle le inclusioni di gas all'esterno, o eventualmente creare dei giochi negli estrattori, in modo da permettere il passaggio dell'aria. Una regola empirica stabilisce che un sistema adeguato di sfiato deve ricoprire il 30% del perimetro della cavità. Un problema che deriva da un scarso sistema di espulsione dell'aria porta alla presenza di sacche di gas o bruciature superficiali che rendono il manufatto un pezzo scarto.

Considerando che l'aria intrappolata nel fuso subisce una trasformazione adiabatica di compressione allora segue la legge

$$pv^k = cost$$

dove  $p$  è la pressione [Pa],  $v$  il volume massico specifico [ $m^3/kg$ ] e  $k$  esponente dell'adiabatica (per l'aria  $k = 1,4$ ) e trattando l'aria come un gas ideale alla pressione atmosferica allora risponde alla legge del gas ideale

$$pv = RT$$

$R = 287 \text{ kJ/kg}$  è la costante del gas aria

Sostituendo nella prima equazione la legge del gas ideale, posso esplicitare la temperatura  $T_2$  di fine compressione, per dimostrare che è più elevata della prima, provocando delle bruciature superficiali nel pezzo senza gli adeguati canali di sfiato:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-k}{k}}$$

in cui  $T_1, p_1$  temperatura e pressione a inizio compressione,  $T_2, p_2$  temperatura e pressione a fine compressione.

Il rapporto  $p_1 / p_2$  è minore di zero, mentre l'esponente è una quantità negativa quindi la potenza che ne risulta è un valore maggiore dell'unità che va ad incrementare la temperatura di inizio compressione.

Accanto ai sistemi passivi, esistono quelli attivi, caratterizzati dalla presenza di dispositivi per l'aspirazione del gas; in questo caso le figure sono svuotate prima dell'iniezione. Per alcuni materiali polimerici altamente fluidi è necessaria l'espulsione attiva del gas, in quanto si rischia un'occlusione indesiderata dei canali prima del completo riempimento. Sicuramente un sistema attivo risulta molto più sicuro ed efficiente di uno passivo, ma i costi per l'installazione dell'impianto ausiliario sono maggiori, andando ad incrementare i costi di investimento iniziali.

#### 1.5.4. Materiale dello stampo

La scelta del materiale dipende fundamentalmente dalle dimensioni del manufatto e dalla durata della produzione. I requisiti che un materiale deve soddisfare sono:

- Elevata lavorabilità in fase di produzione dello stampo;

- Possibilità di eseguire trattamenti termici senza alterare lo stato di tensione interne dello stampo;
- Buone caratteristiche meccaniche (durezza);
- Elevata resistenza al calore, all'usura e alla corrosione;
- Ottima conducibilità termica.

Per la realizzazione dello stampo il materiale più utilizzato è sicuramente l'acciaio: acciai da cementazione e da tempra, acciai da nitrurazione, acciai da bonifica ed acciai inossidabili.

Altri materiali per soddisfare richieste di stampaggio particolari sono: leghe di rame, leghe di zinco, leghe di alluminio o leghe di bismuto.

#### 1.5.5. Sistema di raffreddamento

È un impianto indispensabile per l'esportazione del calore nello stampo, al fine di avere sempre una temperatura omogenea in tutte le zone dello stampo e di ridurre al minimo il tempo di raffreddamento. I raffreddatori possono essere ad aria o ad acqua, i secondi per manufatti di grandi dimensioni e necessitano di un impianto ad acqua esterno alla pressa.

#### 1.6. L'unità di chiusura

Il sistema di chiusura della pressa ha la funzione di chiudere lo stampo imprimendo una forza quando il materiale si sta plasticizzando all'interno della vite, seguito dal mantenimento dello stampo chiuso durante la fase di compattazione. Successivamente, terminata la fase di raffreddamento del manufatto, il motore aziona il meccanismo di apertura dello stampo e sgancia il prodotto finito dallo stampo per mezzo degli estrattori.

Al gruppo di chiusura è affidato il compito fondamentale di contrastare la forza di apertura che si genera a causa dell'iniezione del polimero fuso nello stampo.

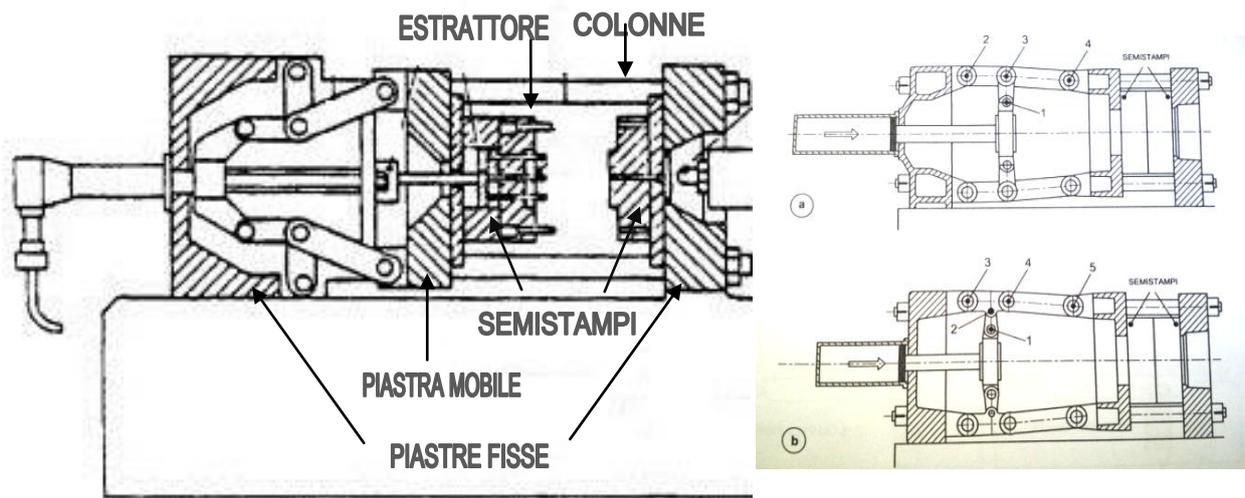


Figura 11 - schema del gruppo di chiusura a ginocchiera [4]

Dalla fig. 11 si può vedere che il gruppo di chiusura è costituito da due piastre fisse sorrette da quattro colonne, posizionate a due a due per lato. Tra le piastre fisse è posizionata la piastra mobile che ha il compito di traslare avanti e indietro a seconda che il comando sia di apertura o di chiusura dello stampo. Infine, i due semistampi sono montati secondo un ordine ben preciso: la femmina (parte fissa dello stampo) è posizionata a destra della zona di chiusura, cioè quella più vicina alla zona di plastificazione; il maschio viene collocato nella piastra mobile libera di traslare. Tra i due semistampi sono presenti delle colonne guida che consentono un perfetto accoppiamento nella fase di chiusura per l'iniezione.

I sistemi di chiusura vengono realizzati in vari modi a partire dai metodi diretti, nei quali un unico pistone centrale spinge la piastra mobile verso il semistampo fisso, ormai abbandonati per le ridotte potenze in gioco e gli ingombri notevoli, a sistemi indiretti.

Non si è ancora raggiunto il massimo risultato nel sistema di chiusura: le continue ricerche portano a miglioramenti sempre più eccellenti in merito ad ingombro, rumorosità e usura dei componenti meccanici. Attualmente le migliori unità di chiusura sono quelle a ginocchiera, preferibili rispetto ai sistemi diretti per due motivi:

- Esercitano delle forze di chiusura elevate nonostante la potenza del motore sia minore;
- Utili quando si hanno corse ridotte.

Grazie alla posizione di singolarità che assume il braccio della ginocchiera quando l'angolo  $\alpha$  è pari a zero (posizione della biella manovella a fine corsa), le forze di chiusura aumentano: esse infatti moltiplicano la spinta fatta da un pistone  $\times 25$  volte rispetto ad un semplice pistone.

Inoltre, c'è un'ulteriore distinzione per i sistemi a ginocchiera: sistemi a 4 o a 5 punti di articolazione. I secondi sono quelli più adottati nella costruzione delle presse moderne per le maggiori accelerazioni raggiungibili, con conseguente riduzione del tempo di ciclo.

Uno studio condotto sulla cinematica e dinamica di una ginocchiera a 5 punti di articolazione evidenzia come questa soluzione ha portato ad una precisione nel sistema di chiusura degli stampi, grazie ai controlli cinematici e dinamici della corsa della testa a croce.

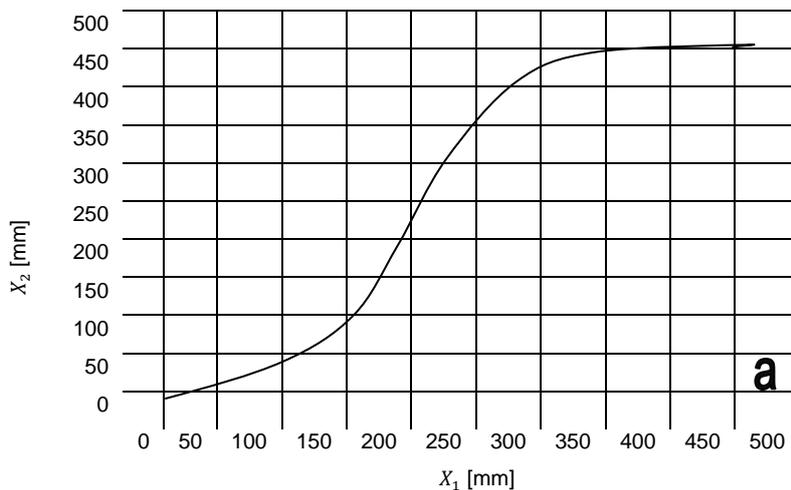
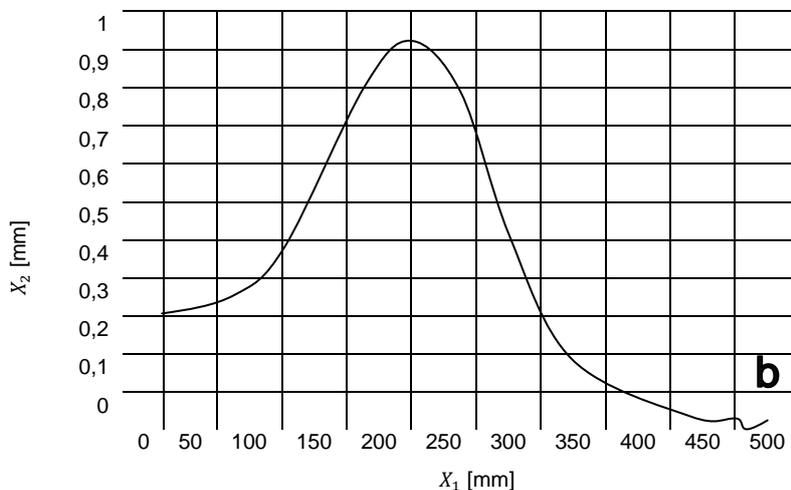


Figura 12 - studio cinematico e dinamico della ginocchiera [4]

Definiamo  $X_1$  lo spostamento della testa a croce,  $X_2$  lo spostamento del semistampo mobile verso quello fisso.

Dal grafico della posizione (grafico a) si dimostra che a ridotti spostamenti della testa a croce corrisponde un maggiore spostamento del semistampo, utile per risolvere i problemi di

ingombro della pressa. Inoltre, si può notare che, nella fase finale della corsa, si ha l'effetto

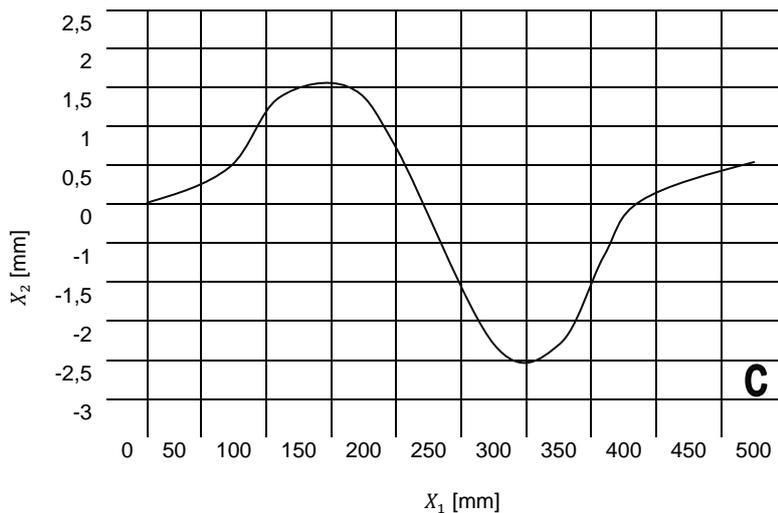


contrario: ad un elevato spostamento della testa corrisponde un piccolo spostamento del semistampo. La riduzione del moto negli istanti finali garantisce un elevato grado di precisione nella chiusura dei due semistampi, indispensabile per avere

delle condizioni di ripetibilità del ciclo di produzione.

Nel grafico b viene riportato l'andamento delle rispettive velocità della testa e dello stampo. Fino a metà corsa della testa la velocità dello stampo cresce, superato il picco massimo decresce fino ad avanzare in maniera quasi statica negli istanti che precedono la fine corsa.

L'andamento dinamico delle accelerazioni riportato nel grafico c stabilisce i limiti massimi e minimi che può raggiungere lo stampo:  $1,5 \text{ m/s}^2$  in fase di accelerazione,  $-2,5 \text{ m/s}^2$  quando decelera.



I sistemi di regolazione di sicurezza che agiscono sulle pressioni generate dalla forza di serraggio del sistema di chiusura, garantiscono la precisione millimetrica in fase di chiusura/apertura dello stampo, inoltre bloccano il macchinario in presenza di corpi estranei.

Per scegliere il valore della forza di chiusura, e quindi per poter scegliere la taglia della pressa, si calcola il prodotto dell'area proiettata della figura (o della somma delle figure di uno stampo), cioè l'area della proiezione della stessa sul piano perpendicolare alla direzione di chiusura dello stampo con i canali di iniezione inclusi e moltiplicata per la pressione massima. Il risultato ottenuto è maggiorato del 15% - 20% per motivi di sicurezza.

$$F_{serraggio} = 1,2 \times (A_{proiettata\ delle\ figure} \times p_{max})$$

### 1.6.1. Estrattori

I sottosquadri presenti nello stampo e i ritiri che si verificano durante la fase di mantenimento provocano delle adesioni del manufatto alle pareti dello stampo: più precisamente si verifica una tenuta nello semistampo mobile. L'espulsione del pezzo stampato e solidificato avviene per mezzo degli estrattori, componenti meccanici che possono essere di tipo pneumatico, idraulico ed elettrico; sono collegati al motore dell'unità di chiusura e agiscono provocando una forza sul manufatto una volta che lo stampo è aperto.

Gli estrattori tradizionali sono molto efficienti quando si tratta di espellere componenti stampati piccoli ed agiscono imprimendo una forza agli stessi che li spinge per effetto gravitazionale verso i nastri trasportatori.

Gli estrattori presenti in commercio sono dei perni cilindrici a sezione circolare con diametro che varia tra i 1,5 mm e i 25 mm, sono soggetti a instabilità per carico di punta e quindi soggetti a una forza massima (forza critica) che possono imprimere.

Per quanto riguarda il posizionamento nello stampo, si considera che un estrattore lascia l'impronta, quindi bisogna posizionarli in zone non estetiche dello stampo.

Nel caso di manufatti di grandi dimensioni, bisognerebbe aumentare la forza di estrazione, soluzione non conveniente in alcuni casi. L'introduzione dei manipolatori, particolare tipologia di macchinare ausiliario, riduce i problemi di estrazione di grandi componenti.

### 1.7. Le viti a ricircolo di sfere

Per la conversione da moto rotatorio a lineare dal motore è necessario un componente meccanico aggiuntivo: la vite a ricircolo di sfere, che è un particolare tipo di vite filettata (concava) in cui vengono inserite delle sfere nel vano a spirale creato. L'evoluzione verso questo tipo di componente meccanico ha permesso di convertire l'attrito radente in attrito volvente, preferibile al primo perché ha una resistenza molto minore con conseguente minore forza da applicare per avere lo stesso risultato.



Figura 13 - vite a ricircolo di sfere

Man mano che la chiocciola avanza, le sfere vengono scaricate dietro la chiocciola stessa, trasportate davanti ad essa e automaticamente ricaricate, dando origine al nome della vite.

L'utilizzo della vite a ricircolo di sfere garantisce dei vantaggi:

- Elevata efficienza ( $\eta=90\%$ ) e durata;
- Resistenza all'usura;
- Significativa rigidità assiale;
- Riduzione dell'attrito tra le parti in contatto.

### 1.8. I parametri costruttivi delle pressa e classificazioni

Una pressa per l'iniezione è caratterizzata da:

- **Volume massimo di iniezione**, espresso in  $cm^3$ . È il volume massimo di iniezione teoricamente iniettabile in ogni ciclo, calcolato in base alla geometria del sistema. Si calcola come prodotto della sezione del pistone per la sua corsa;
- **Portata volumetrica massima di iniezione**, espressa in  $cm^3/s$ . Si riferisce alla portata di iniezione in riferimento alla velocità massima di traslazione della vite;

- **Portata massima di plastificazione**, espressa in  $g/s$ . Valuta la portata massima di polimero fuso, se questa variabile è troppo grande rispetto al volume della stampata si ha un tempo di attraversamento della vite troppo lungo con conseguente degrado del polimero e tempi di ciclo troppo lunghi;
- **Pressione massima di iniezione** [Pa]. È generata dal moto traslatorio della vite verso lo stampo;
- **Forza massima di chiusura dello stampo** [N]. Esprime la forza massima che il meccanismo di chiusura è in grado di esercitare sullo stampo, forza che riesce a contrastare la pressione di iniezione;
- **Passaggio tra le colonne**. È il parametro che identifica la massima dimensione dello stampo che può essere montato nella pressa. In caso di stampo molto grande si può eliminare una colonna per installarlo, mentre se lo stampo è eccessivamente piccolo rispetto al passaggio tra le colonne è preferibile montarlo su presse di misura minore, in quanto la forza di chiusura provoca delle flessioni sulle piastre, fino a causare anche la rottura delle colonne. Uno stampo di misura ottimale ricopre almeno il 70% dell'area tra le colonne;
- **Disposizione dell'unità di chiusura** rispetto al gruppo di plastificazione: le presse vengono classificate in orizzontali (H) o disposte verticalmente (V);
- **La corsa di apertura** del piano mobile, cioè la distanza massima tra i due semistampi in posizione aperta;
- Il **tempo di ciclo** a vuoto che la pressa può effettuare alla velocità massima, senza produzione di manufatti.

Le presse vengono classificate in base alla loro taglia (forza di chiusura):

- Presse piccole, con taglie tra i 50-100 tonnellate (1 tonnellata =  $10^4$  N), con diametri della vite di circa 25 mm e volumi di iniezione di 30-100  $cm^3$ ;
- Presse medie, taglie tra le 100-600 tonnellate, diametri nel range 35-100 mm e volumi di iniezione da 200 a 2000  $cm^3$ . Il numero di giri della vite è di circa 200-300 rpm, la pressione di iniezione pari a 1000-2500 bar (1 bar =  $10^5$  Pa) e il flusso di iniezione di 100-1000  $cm^3/s$ ;
- Presse grandi. La forza di chiusura varia tra 1500 e le 10000 tonnellate, volumi di iniezioni fino a 200000  $cm^3$ , utilizzate solo per grandi manufatti (cabine telefoniche, componenti di una nave, contenitori per rifiuti, settore automobilistico).

## 1.9. Regolare una pressa

L'evoluzione nel controllo di avanzamento del fuso è soggetto a continui sviluppi: dal semplice controllo della pressione idraulica nelle presse senza vite di plastificazione si è passati a gestire profili di velocità e pressione con precisione crescente.

Un sistema di controllo del processo adeguato permette di avere un utile riferimento su quanto accade all'interno della pressa durante tutte le fasi del processo. Per avere un

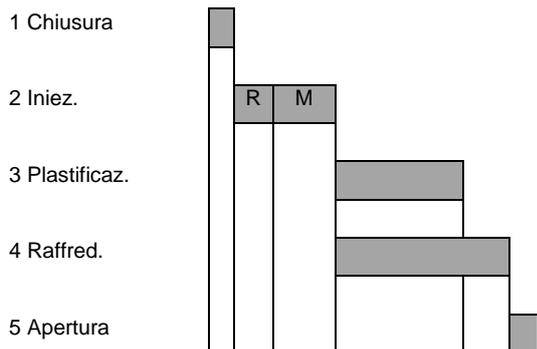


Figura 14 - fasi del ciclo identificate nel processo e nei controlli della pressa [2]

macchinario efficiente, che operi in modo ripetitivo e produttivo, è necessario conoscere tutti i parametri interni, in modo da poter cambiare le variabili che non sono adeguate al particolare processo di stampaggio o al polimero utilizzato. Al fine di migliorare le prestazioni quindi, si associa ad ogni fase del processo una variabile di

controllo, per avere un riferimento in merito alle condizioni migliori della determinata sequenza.

Ricordiamo le fasi del processo di stampaggio:

1. Chiusura dello stampo;
2. Iniezione (che si suddivide in riempimento e mantenimento);
3. Plastificazione;
4. Raffreddamento;
5. Apertura dello stampo ed estrazione.

Le fasi di chiusura/apertura dello stampo (1 e 5) sono regolate da **controlli di velocità**, mentre alle fasi di iniezione/plastificazione/raffreddamento si assegnano dei tempi. Nel tempo di riempimento il parametro di controllo è la velocità di avanzamento della vite (che equivale al controllo della portata di massa da iniettare); per quanto riguarda il mantenimento (fase di compattazione) si ha il **controllo della pressione** che è di fondamentale importanza sulla qualità e riproducibilità del ciclo di stampaggio.

Il passaggio dalla prima pressione (riempimento) alla seconda pressione (mantenimento), viene definito anche **transizione V/P** in quanto si passa da un controllo volumetrico della velocità ad un controllo di pressione. Questa commutazione incide sulla qualità della stampata e spesso porta ad errori: una ridotta erogazione del polimero fuso nella cavità rispetto alle condizioni studiate non raggiunge il volume fissato per la commutazione V/P con una conseguente fase di mantenimento alla massima pressione della pressa.

La regolazione durante le varie fasi e la movimentazione avviene tramite un microprocessore con sistema di controllo ad anello aperto o ad anello chiuso, inoltre i dati del processo vengono registrati per verificare che non siano presenti troppe oscillazioni tra i vari cicli. In caso di scostamenti elevati la macchina arresta la produzione.

Nelle regolazioni ad **anello aperto** si impostano valori di velocità, pressione temperatura e la pressa agisce in modo da non superarli.

Nelle regolazioni ad **anello chiuso** invece, se il controllore rileva degli scostamenti in uno dei parametri agisce in autonomia sui componenti in modo da ristabilire il valore prefissato della variabile. Ad esempio se si verifica un innalzamento della temperatura del materiale fuso all'interno della vite, che può portare a degradazione del polimero in fase di plastificazione, la pressa agisce riducendo la velocità di avanzamento o riducendo la temperatura delle resistenze del cilindro. I sistemi di controllo a circuito chiuso sono determinanti nell'evoluzione delle presse per la plastificazione: l'introduzione del sistema informatico che consente la comunicazione diretta tra gli organi della pressa e il sistema di controllo permette di ridurre e monitorare le oscillazioni della produzione; inoltre si è in grado di progettare caso per caso delle stampate più precise.

### 1.9.1. Focus: evoluzione della pressione

È già stato anticipato come il controllo della pressione sia fondamentale per ottenere delle condizioni di massima produttività del macchinario, le quali si ottengono solo seguendo l'evoluzione della pressione durante tutte le fasi del ciclo di stampaggio. In figura 15 è riportato il grafico dell'andamento della pressione entro le cavità dello stampo durante l'intero processo produttivo.

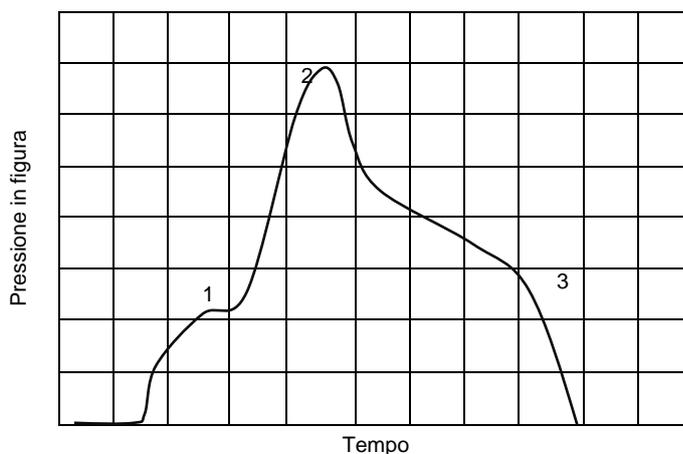


Figura 15 - andamento della pressione nel processo [4]

Fino al punto 1 si ha il riempimento della cavità con il polimero fuso, in questa fase a controllo volumetrico si ha un graduale aumento della pressione che raggiunge circa il 50% del picco massimo di pressione. La vite invece, ha compiuto il 95% della sua corsa ed ha iniettato la stessa percentuale di volume.

Nella seconda fase di impaccamento viene introdotto nello stampo il 5% del volume di fuso restante sfruttando la comprimibilità del materiale, con una conseguente riduzione del volume. Per compensare al ritiro volumetrico del materiale (quindi per non creare difetti nel manufatto), si agisce comprimendo il materiale fino ad arrivare alla pressione massima nel punto 2. Nella camera di iniezione rimane sempre una piccola quantità di polimero, in modo da sfruttare "l'effetto cuscino", che ha il compito di trasmettere con continuità la pressione della vite al polimero nello stampo. Il volume che rimane in camera di plastificazione deve essere tale da non originare difetti sul pezzo (se è troppo piccolo), e non avviare una solidificazione precoce nella camera (se è troppo grande).

Nel punto di picco della pressione ( $p_{max}$ ) inizia il raffreddamento con deflusso del polimero: durante questa fase il materiale comincia a ritirarsi per la diminuzione della temperatura, però lo stampo è ancora in comunicazione con la camera di iniezione la quale provvede ad iniettare nuovo polimero per compensare il ritiro. La pressione durante il mantenimento decresce fino a raggiungere il 50% della pressione massima.

Nel punto 3 il polimero inizia la solidificazione a partire dal punto di iniezione, bloccando ulteriori scambi di massa tra la vite e lo stampo: da questo punto in poi ulteriori ritiri del materiale non vengono compensati. Segue un'ulteriore riduzione della pressione in maniera lineare con il calore, fino a raggiungere la pressione atmosferica. Una volta azzerato il valore di pressione lo stampo viene aperto per estrarre il pezzo, il quale dovrà asportare ancora il 5% del calore accumulato, ma la temperatura consente la manipolazione senza distorsioni.

I valori di massimo e minimo che la pressione assume durante il ciclo di stampaggio sono tali da non superare i le pressioni limite determinate dalla taglia della pressa ed inoltre devono generare delle forze di iniezione che rientrino nelle capacità della forza di chiusura della pressa stessa.

È facile intuire che la pressione assume valori diversi in base alla posizione all'interno della pressa in cui viene misurata. Uno studio condotto su una pressa ad azionamento idraulico dimostra che la pressione ideale erogata dal motore presenta picchi più elevati e duraturi rispetto alla pressione reale: già nel cilindro di plastificazione si registrano delle perdite di carico dovute agli attriti tra il cilindro e la vite. La perdita di energia per attrito causa una riduzione della pressione reale nella fase di compressione e mantenimento con valori che variano tra il 3% - 5% della pressione erogata, ma se una pressa è sfruttata male possono arrivare anche al 10%.

Inoltre, bisogna considerare anche la viscosità del polimero: i materiali con caratteristiche viscosive più elevate hanno bisogno di pressioni di iniezione più elevate, quindi i valori raggiunti dipendono dalla capacità del materiale di fluire nello stampo in funzione del vincolo di portata, da qui si dimostra come il controllo della prima pressione sia di tipo volumetrico. Le presse possono limitare il valore massimo della pressione di iniezione, e quando viene raggiunto il riempimento, continua a pressione costante riducendo in modo automatico la portata iniettata.

Nella fase di iniezione, si ha una commutazione dal controllo volumetrico (durante il riempimento) ad un controllo di pressione durante la seconda fase di mantenimento (transizione V/P), nella quale viene impostato il valore di pressione tale da compensare le contrazioni di raffreddamento nel pezzo stampato. La pressione reale locale diminuisce gradualmente in funzione della diminuzione della temperatura; mentre nel caso ideale si può considerare come se fosse quasi a pressione costante grazie all'introduzione di materiale per la compensazione. In seguito al raffreddamento con deflusso si ha una rapida diminuzione della pressione dovuta all'interruzione del flusso di materiale nello stampo.

Infine, la pressione deve essere azzerata prima dell'apertura dello stampo (fino alla pressione atmosferica) per non avere problemi di adesione del manufatto allo stampo.

Da grafico dell'evoluzione della pressione si può dedurre quanto segue:

- I picchi di pressione prima dell'iniezione sono molto più elevati che nella fase di mantenimento perché il flusso dinamico ha portate decisamente maggiori nell'iniezione (il 95% del volume totale) rispetto alle basse condizioni di flusso della seconda (il restante 5%)
- Le pressioni in alcuni punti della cavità non si annullano nonostante la pressione generata dal motore sia azzerata. La causa è l'elevata compressibilità dei materiali polimerici fusi, che può consentire di limitare il tempo di mantenimento in pressione (compattazione), riuscendo comunque a compensare i ritiri volumetrici dovuti al raffreddamento.

Per una corretta progettazione del processo di stampaggio, bisogna uniformare due variabili che localmente presentano differenze all'interno dello stampo:

- Le diverse **pressioni locali**: il materiale solidifica all'interno dello stampo con diverse condizioni di pressione locale che influenzano le caratteristiche del manufatto.
- Le variazioni locali di **temperatura**: all'interno della cavità si registrano delle differenze di temperatura dovute al bilancio tra il raffreddamento del materiale che scorre nello

stampo freddo e il suo riscaldamento per dissipazione termica delle perdite di pressione derivate dal suo flusso.

### *Andamento della pressione locale*

Si studia l'andamento della pressione nel caso di un semplice flusso monodimensionale che fluisce all'interno dello stampo.

Partendo dalla fase di iniezione, la pressione puntuale ha un andamento decrescente in funzione della distanza dalla zona di iniezione: nel punto vicino al gruppo di plastificazione si ha il massimo valore di pressione che decresce man mano che ci si avvicina alle pareti dello stampo. Questo fenomeno si verifica nel caso di un sistema a canali tradizionali: lo stampo, a temperatura ambiente, è più freddo del fluido che ne fluisce al suo interno. Nelle zone più calde vicino all'iniezione la viscosità è minore per effetto di una maggiore temperatura, ma la pressione è maggiore; mentre nelle zone più vicine alla cavità il fuso si raffredda istantaneamente a contatto con la superficie dello stampo, andando ad aumentare le caratteristiche viscosi che si oppongono alla pressione locale. L'andamento decrescente descritto

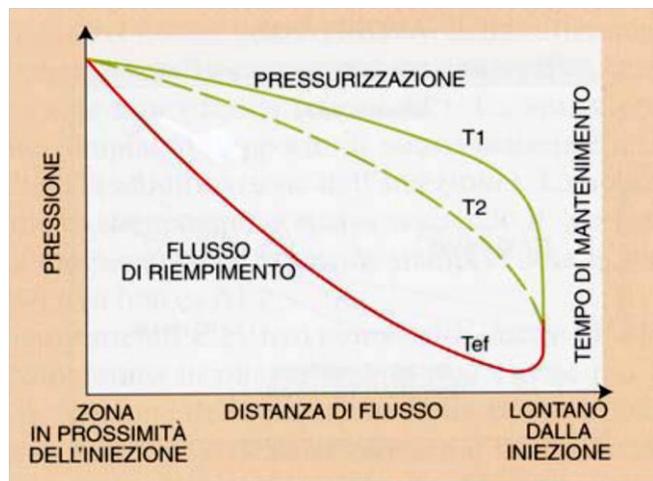


Figura 16 - pressione locale nelle fasi di riempimento e compattazione [2]

continua finché non si ha un completo riempimento dello stampo.

Nell'istante in cui si ha il riempimento totale dello stampo (*filling*), la pressione tende a salire velocemente in tutte le zone della cavità (curva T1). Questa è la fase di pressurizzazione, che precede il mantenimento: la pressione deve essere tale da compensare il ritiro volumetrico del materiale dovuto al raffreddamento, la quale risulta complessivamente omogenea, ma comunque è sempre localmente ridotta nelle zone a contatto con lo stampo a causa del raffreddamento istantaneo del polimero a contatto con lo stesso.

Nella fase di mantenimento si verificano delle continue cadute di pressione che variano in funzione della distanza dall'iniezione, determinate dall'aumento della viscosità dovuta alla continua asportazione di calore nel manufatto. Allora il manufatto si solidifica a pressioni locali diverse da punto a punto nelle cavità, con conseguenti differenze di densità che possono portare a possibili deformazioni.

Da queste analisi si ha una considerazione di estrema importanza per quanto riguarda il risultato finale del processo di stampaggio: anche se si posiziona la zona di iniezione in

modo tale da garantire il completo riempimento dello stampo, può essere insufficiente per le caratteristiche di uniformità delle proprietà.

Un miglioramento alle condizioni di omogeneità si verifica con l'introduzione della progettazione dei profili di pressione: determinare i profili consente di avere più uniformità nel ritiro di materiale in tutte le zone dello stampo, con conseguente controllo delle deformazioni. Negli ultimi anni di evoluzione tecnologica dei macchinari, sono stati introdotti dei sensori di pressione nello stampo, che consentono una misurazione precisa e locale della pressione, cosa che nelle presse idrauliche non è ancora così definita.

### *Determinare la pressione di iniezione*

Dal punto di vista della progettazione, si ha un punto di ottimo quando si riduce al minimo la pressione di iniezione, in modo da utilizzare motori a con potenze inferiori (minore costo), compensate da un aumento del volume del materiale da iniettare, che richiede maggiori capacità di plastificazione. L'incremento del volume implica un aumento dei costi del materiale e maggiori tempi richiesti per il raffreddamento che aumentano il tempo di ciclo del processo.

Oltre a garantire la massima efficienza e l'elevata produttività, al fine di avere un guadagno economico, ci si deve porre l'obiettivo di minimizzare i costi di investimento e di produzione. È facile intuire allora che minimizzando la pressione di iniezione, sarà minore la taglia della pressa da acquistare, che quindi riduce i costi di investimento iniziali.

Il grafico 17 indica il punto di ottimo che corrisponde al punto di pressione di iniezione minima in funzione del tempo di riempimento. Sono illustrati tre casi differenti a seconda del tipo di fluido in esame:

- la retta indica un fluido comune come l'acqua: un raddoppio della portata di fluido implica un raddoppio della pressione. Comportamento tipico dei fluidi newtoniani
- La curva monotona crescente è tipica dei fluidi non-newtoniani: all'aumentare della portata, diminuisce la relazione pressione/portata. Il caso più frequente in cui il fluido segue questo andamento è nello stampo a canali caldi, in cui la portata aumenta

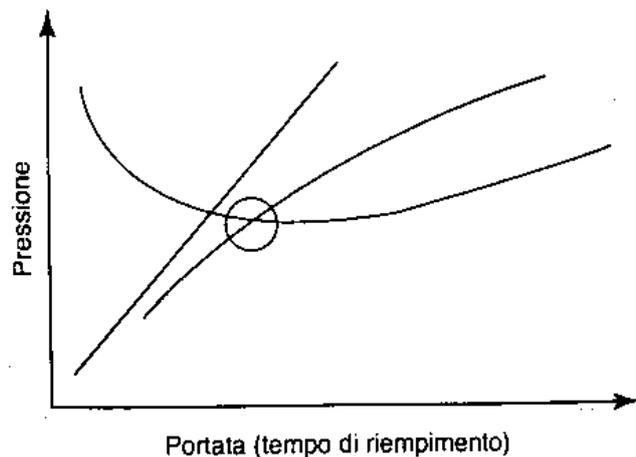


Figura 17 - curve di pressione [2]

sempre all'aumentare della pressione grazie al passaggio del fuso in uno stampo che è alla sua stessa temperatura

- La curva a U si riferisce a materiali polimerici in stampi a canali freddi: la pressione presenta un minimo per un determinato volume di iniezione, poi risale indipendentemente dalla portata. Inizialmente, all'aumentare della portata, la pressione diminuisce quindi diminuisce la viscosità. All'aumentare della velocità (legata alla portata) il fuso si riscalda ulteriormente per effetto dell'attrito, la velocità di riempimento diminuisce, di conseguenza diminuisce il raffreddamento. Superato il punto di minimo, se si aumenta la portata, le perdite di pressione non sono più compensate dall'effetto benefico della viscosità, allora la pressione torna ad aumentare.

Il punto di minimo che interseca le due curve identifica il punto di ottimo per la pressione/portata che riguarda sia stampi a canali tradizionali, che stampi a canali caldi (senza materozza).

### 1.9.2. Focus: il bilancio termico e il raffreddamento

#### *Il bilancio termico*

Consideriamo per l'analisi del bilancio termico un fluido non-newtoniano, che corrisponde alle caratteristiche del polimero allo stato fuso. Il processo di scambio di calore avviene in maniera non isoterma cioè con scambio di calore tra fluido e lo stampo, che corrisponde ad un sistema di alimentazione a canali freddi.

Il polimero allo stato fuso scorre dalla zona di iniezione verso le cavità dello stampo passando per il sistema di alimentazione costituito dalla carota e dai canali. La parte di fuso che entra in contatto con lo stampo a temperatura ambiente solidifica istantaneamente creando un sottile strato di polimero (guaina solida) che definisce il nuovo perimetro della cavità. Lo strato solidificato ha due effetti sul fluido: funge da isolante tra lo stampo freddo e il polimero, riduce la sezione della cavità con conseguente aumento della velocità del flusso. Al centro il materiale rimane allo stato fuso a bassa viscosità ed è libero di scorrere entro lo stampo. Nella zona in testa, il fluido ha ancora a disposizione tutta la sezione della cavità, quindi la velocità in testa è minore della velocità del fluido al centro. Questa differenza tra le velocità di scorrimento provoca il comportamento di flusso a fontana, tipico di fluidi non-newtoniani.

Man mano che entra polimero fuso, per effetto dell'attrito, si scalda la guaina solida, che successivamente cede calore allo stampo freddo.

Inizialmente lo strato solido è molto sottile, quindi cede calore all'esterno rapidamente; con il fluire del polimero fuso, associato ad un rapido raffreddamento, si incrementa lo strato definito come guaina che quindi aumenta il tempo di raffreddamento in funzione del tempo.

Dopo un certo intervallo di tempo, lo strato solido avrà uno spessore tale che il calore ceduto allo stampo per conduzione eguaglierà quello introdotto dal flusso di polimero in ingresso e quello generato per attrito sullo strato congelato. Viene così raggiunta una condizione di equilibrio termico.

Gli scambi di calore in fase di riempimento avvengono a velocità elevata, quindi anche l'equilibrio termico viene raggiunto dopo pochi istanti. Durante lo scorrimento dentro i canali il polimero ha delle specifiche proprietà fisiche, di moto e di strato limite che influiscono sullo scambio termico: è soggetto ad uno sforzo di taglio che ordina le molecole lungo la direzione principale del flusso; all'interno dello stampo il gradiente di velocità ( $\dot{\gamma}$ ) non è costante ed infatti è massimo in corrispondenza dello strato solido (velocità nulla) e cade a zero al centro (velocità del fluido indisturbato, fuori dallo strato limite).

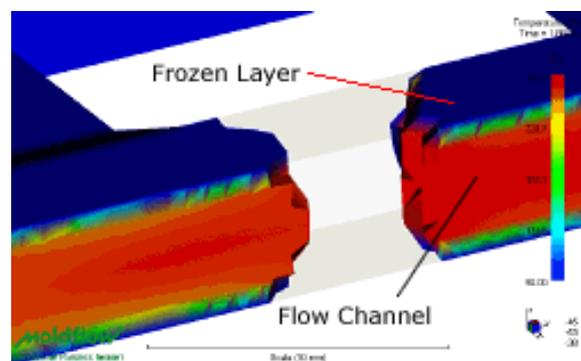
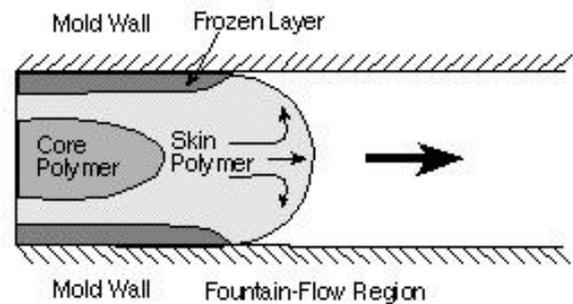


Figura 18 - andamento del polimero fuso in uno stampo a canali tradizionali visto schematicamente con il software di prototipazione. Le zone rosse indicano il cuore fuso, quelle blu sono le parti già solidificate a contatto con lo stampo

Terminata la fase di riempimento la situazione cambia: il flusso si arresta e inizia il raffreddamento che, a differenza di quanto avviene nello strato esterno è molto lento. Analizzando gli effetti dell'orientamento sul livello di stress residuo si nota che la superficie esterna (a raffreddamento rapido) è fortemente orientata ed avrà un elevato ritiro in fase solida, ma comunque è contrastata dallo strato interno che non ha orientamento molecolare.

Durante la fase di scambio termico si possono individuare tre fenomeni termici:

- Uno scambio per conduzione tra lo strato solido e la parete dello stampo;
- Uno scambio per convezione lungo la direzione di avanzamento del fluido (considerata monodirezionale);
- La dissipazione meccanica dovuta all'attrito che si trasforma in calore.

Se esaminiamo lo scambio termico a livello locale, un problema frequente nella fase del raffreddamento si verifica quando il terzo tipo di scambio termico prevale sugli altri due, con un conseguente innalzamento della temperatura ai confini dello stampo: non sempre si verifica la condizione in cui il valore massimo della temperatura è nel cuore della sezione. Quando non si verifica più la condizione di equilibrio termico possono insorgere dei problemi l'allungamento del tempo di ciclo, presenza di deformazioni e degradamento del polimero. Anche in questo caso, come è stato dimostrato per l'andamento della pressione locale, è necessario avere quanta più possibile omogeneità della temperatura dello stampo; che si traduce nell'averne una precisa velocità di iniezione del polimero in fase di riempimento:

- Se la velocità è troppo elevata si verificano fenomeni di schizzi (*jetting*), possibilità di occlusioni di aria e bruciature dovute alla temperatura troppo elevata;
- Se la velocità è troppo bassa si evidenziano fenomeni di difettosità superficiale dovute a cattive linee di saldatura dei flussi.

### *Il raffreddamento*

Stabilire un corretto tempo di raffreddamento è una delle decisioni determinanti per lo stampaggio ad iniezione, in quanto il tempo di raffreddamento riguarda circa la metà del tempo per compiere un ciclo completo: avere tempo di raffreddamento ottimale significa ridurre il tempo di ciclo, ridurre i costi di produzione e aumentare il profitto.

Per avere una qualità massima del prodotto finale, è utile considerare alcuni aspetti che riguardano il sistema di raffreddamento: l'efficienza del raffreddamento, la quantità di calore da asportare e la disposizione dei canali di raffreddamento.

Ricordiamo che un manufatto, può considerarsi raffreddato quando raggiunge una temperatura sufficiente a consentirne l'estrazione senza provocare distorsioni. Si considera che il raffreddamento sia effettuato in maniera ottimale quando si verificano le due condizioni:

- La velocità di raffreddamento è calcolata in base alle caratteristiche del polimero utilizzato;
- Il raffreddamento avviene in maniera uniforme: il mancato rispetto è causa di deformazioni che comportano allungamenti del ciclo di raffreddamento nell'immediato; inoltre se si analizza l'aspetto qualitativo nel lungo periodo, si verifica che si possono creare post-ritiri che si manifestano con il tempo, a seguito del rilassamento delle tensioni.

Si ha massima efficienza di raffreddamento quando il fluido ha un moto di tipo turbolento: in regime laminare il moto è soltanto di tipo molecolare, mentre per valori di Reynolds superiori a 2300 (e fino ad un massimo di 10000) l'efficienza aumenta in funzione della velocità del flusso. È da evidenziare che non si ottiene una massima asportazione del calore abbassando il più possibile la temperatura del fluido: per avere un manufatto privo di difetti è necessario che la temperatura del fluido refrigerante sia maggiore della temperatura di rugiada. Una temperatura minore crea condensa, che porta a difettosità nella superficie dei pezzi e ad ossidazioni nella cavità dello stampo.

La quantità di calore da asportare varia per ogni tipo di materiale e geometria del manufatto da stampare. Ci si avvale della formula seguente per determinare la portata di acqua necessaria al raffreddamento. Considerando una lastra piana a geometria semplice, con flusso monodimensionale e temperatura locale uniforme la quantità di calore da asportare risulta idealmente:

$$Q = \dot{m}(h_f - h_i)$$

Ci si riferisce a  $\dot{m}$  come portata di massa (in kg/s) moltiplicata per la differenza di entalpia tra lo stato finale e iniziale, nel quale  $h_f$  si riferisce all'entalpia calcolata durante l'estrazione del pezzo, quella iniziale riguarda il riempimento dello stampo. Come anticipato prima, questa formula si deve considerare solo per calcolare il calore medio da asportare, utile come riferimento, in quanto trascura il calore sviluppato per attrito del fuso a contatto con lo stampo, lo scambio di calore per convezione e irraggiamento tra stampo e ambiente esterno. Nella realtà il calcolo del calore da asportare è molto più complesso e spesso soggetto a complicazioni che provocano difetti nel manufatto: bisogna considerare fenomeni di scambio per conduzione tra polimero e stampo e convezione tra refrigerante e stampo. Per questo motivo non si può parlare tanto di raffreddamento ma di sistema di condizionamento considerando il circuito refrigerante uno scambiatore di calore, che deve comprendere:

- Disposizione, tipo, dimensioni di tutti i componenti del circuito di condizionamento;
- Il fluido di raffreddamento (tipicamente acqua);
- La portata di fluido refrigerante e la pressione necessaria;
- La temperatura di condizionamento del fluido;
- Il tipo di acciaio utilizzato per costruire lo stampo.

Il tempo necessario al raffreddamento è in funzione alla velocità di raffreddamento quindi, per ridurre il tempo totale di ciclo bisogna avere una velocità sufficientemente elevata, che però presenta un limite: ad alte velocità di solidificazione si hanno cristallizzazioni parziali

che causano ridotti ritiri, ma alti post-ritiri (come spiegato per l'andamento del flusso a fontana, il polimero fuori dallo strato limite cuore non si comporta come quello ai lati), le quali influenzano negativamente le proprietà meccaniche del manufatto. Si riscontra una riduzione della resistenza a fatica, resistenza alla trazione e l'allungamento.

È intuitivo pensare che la velocità con cui si raffredda il pezzo sia legata alla temperatura dello stampo: minore è la temperatura dello stampo, maggiore è la velocità. Dunque il controllo di questa variabile dipende unicamente da quanto è riscaldato lo stampo, in funzione dello spessore della cavità: manufatti con spessore di 1 mm necessitano di stampi portati ad una temperatura di 100 °C, mentre per spessori di 3 mm è sufficiente una temperatura pari a 50 °C. Un accumulo di materiale si traduce in una concentrazione di calore che incide sulla durata del ciclo.

È possibile determinare il tempo di raffreddamento teorico semplificando l'equazione: si considera la direzione di asportazione del calore monodimensionale, in regime stazionario e la temperatura del pezzo uniforme:

$$t_{cool} = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left( \frac{4(T_{inj} - T_{mold})}{\pi(T_{estr} - T_{mold})} \right)$$

$s$  = spessore del manufatto

$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$  diffusività termica del polimero, espressa in mm<sup>2</sup>/s

$T_{inj}$  = temperatura di iniezione del polimero

$T_{mold}$  = temperatura dello stampo

$T_{estr}$  = temperatura di estrazione del materiale

Nella realtà, questi calcoli servono solo come riferimento poiché sono sovrastimati e portano a tempi di raffreddamento troppo brevi.

Per un corretto calcolo del tempo di raffreddamento si parte dalla formula sopra citata, poi si prosegue per via sperimentale analizzando cosa succede al manufatto applicando differenti tempi di raffreddamento. Il tempo ottimale risulterà quello che elimina tutte le distorsioni alla solidificazione.

Attualmente, a questo approccio, si integra un nomogramma che determina rapidamente la temperatura di raffreddamento in funzione della temperatura di stampaggio, della temperatura media di estrazione e della diffusività termica  $\alpha$ .

## CAPITOLO 2

# Differenze tecniche tra una pressa ad azionamento idraulico e una ad azionamento elettrico

Nel capitolo precedente abbiamo descritto le caratteristiche e i componenti che hanno in comune tutte le tipologie di presse, tralasciando un elemento fondamentale indispensabile per l'esecuzione dei vari movimenti della macchina: il motore.

I motori rotanti hanno la funzione di avviare il macchinario e sono classificati in due grandi categorie:

- Motori **idraulici**, il macchinario completo è una pressa per l'iniezione idraulica;
- Motori **elettrici**, il macchinario per questo tipo di motore è una pressa per l'iniezione elettrica.



Figura 19 - disposizione dei motori in una pressa [5]

### 2.1. Il motore idraulico

Il motore idraulico è una macchina destinata a trasformare l'energia fornita da una sorgente in energia meccanica per mezzo di una pompa, che manda in pressione l'olio motore.

La pressione ottenuta dall'olio genera una forza in relazione alla superficie, la quale fa girare il motore e quindi sposta il carico. Si può determinare idealmente la potenza, e quindi anche la coppia, generata dal motore oleodinamico facendo un bilancio di potenze: considerando nulle le perdite di carico si può porre la potenza generata dal motore elettrico uguale alla potenza necessaria al motore oleodinamico per azionare i movimenti della pressa. Dal bilancio delle potenze si calcola la portata assorbita [ $kg/s$ ], cioè la quantità di olio necessaria per garantire il corretto funzionamento della pompa e la cilindrata  $D$ :

$$C = \frac{D \cdot \Delta p \cdot \eta_m}{63} \quad [6]$$

$\Delta p$  è la differenza di pressione in ingresso e in uscita

$\eta_m$  è il rendimento meccanico.

È necessario calcolare la portata di massa e la cilindrata al fine di determinare le dimensioni del motore e della quantità di olio necessaria: il costo di manutenzione dell'olio è uno degli elementi che incide sui costi di produzione nel processo di stampaggio con presse idrauliche. Un indice importante che influenza le decisioni di acquistare di un determinato macchinario è il rendimento: in un motore idraulico il rendimento complessivo  $\eta_{tot}$  è dato dal prodotto del rendimento volumetrico ( $\eta_v$ ) e del rendimento meccanico-idraulico ( $\eta_m$ ). Oltre alle perdite meccaniche causate dall'attrito, a causa delle perdite di pressione in ingresso e uscita, il rendimento si riduce, andando ad incidere sulle prestazioni della macchina.

Il sistema oleodinamico è composto da tre elementi fondamentali: il **gruppo generatore** che si occupa della trasformazione dell'energia; il **gruppo di controllo**, il quale condiziona l'olio motore e lo mantiene alla pressione e temperatura prestabilita; infine il **gruppo di utilizzo** formato da attuatori (pistoni) di diverso tipo.

I componenti che costituiscono un motore idraulico sono:

- Centralina oleodinamica. Collegata, tramite i tubi rivestiti, in tutte le zone ad azionamento meccanico della pressa. È costituita da una pompa immersa che manda in pressione l'olio, un manometro per il controllo della pressione, il motore asincrono trifase ed uno scambiatore di calore (per aumentare l'efficienza del motore);
- Serbatoio. Recipiente di capacità adeguata che serve a dissipare il calore generato durante il funzionamento del macchinario. All'interno del serbatoio è posizionato un sensore per il controllo di pressione e della temperatura dell'olio, indispensabile per il corretto funzionamento dell'impianto;
- Cilindri idraulici o attuatori. Trasformano l'energia prodotta dalla pompa in energia meccanica;
- Accumulatori. Sono dei dispositivi che immagazzinano l'energia per erogarla solo quando è richiesto dal circuito;
- Valvole. Sono presenti le valvole per il controllo della pressione del fluido motore (pressione massima, perdite di pressione) e le valvole per il controllo della portata (di

non ritorno, di regolazione e di distribuzione). Grazie all'utilizzo dei regolatori si riesce a dare una logica di funzionamento all'impianto idraulico, garantendone la sicurezza;

- Olio o fluido motore. È il componente che interagisce con tutti gli elementi di un motore idraulico; ha la funzione di trasportare l'energia dal generatore all'utilizzatore (in questo caso il pistone); inoltre l'olio motore ha la funzione di lubrificare le giunzioni degli elementi meccanici e asportare calore, riducendo i costi per ulteriori impianti di refrigerazione.

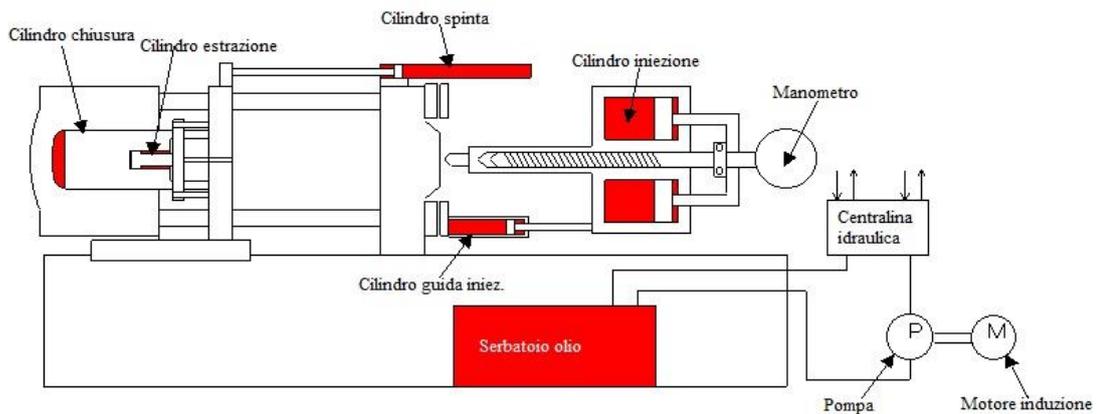


Figura 20 - schema di una pressa con impianto idraulico

### 2.1.1. Principio di funzionamento di un motore idraulico

L'energia parte dal motore asincrono trifase, un dispositivo che converte l'energia elettrica in energia meccanica, il quale mette in moto la pompa. L'energia accumulata come lavoro di compressione in un liquido è praticamente nulla, in quanto l'olio motore è un fluido incomprimibile. Dalla formula del lavoro per sistemi chiusi si vede che  $L_a = \int_{V_1}^{V_2} p dV$  è nullo, perché il volume non cambia. Se consideriamo il sistema con deflusso, e dunque il lavoro necessario a pompare il fluido nella pompa  $L_p = - \int_{p_1}^{p_2} V dp$  è minimo.

È necessaria la presenza di accumulatori, per immagazzinare energia meccanica ed erogarla quando è necessario, per compensare le perdite di carico durante i transitori. Gli accumulatori sono dei componenti che contengono azoto all'interno e fungono da "polmone" per l'olio: lo tengono in costante movimento, in modo da variare la velocità con cui fluisce nel circuito, che ne determina la pressione all'interno.

I pistoni sono azionati dall'olio motore in pressione e mettono in moto la vite di plastificazione facendola traslare.

La centralina è situata in testa al gruppo di plastificazione (a destra della pressa) e provvede ad alimentare sia l'unità di iniezione che l'unità di chiusura della macchina stessa, quindi un

solo motore nella pressa garantisce il movimento di tutti i componenti della pressa idraulica. La potenza necessaria per alimentare la pompa, che corrisponde alla potenza necessaria ad azionare il motore, è:

$$P_{pressa} = \frac{P_{idr}}{\eta_{tot}} = \frac{P_{idr}}{\eta_v \eta_m} \quad [7]$$

con  $P_{idr} = p \cdot Q$  potenza della pompa idraulica, data dal prodotto della pressione [Pa] e della portata di fluido motore erogata [lt/s].

### 2.1.2. Caratteristiche del fluido oleodinamico

L'olio è il mezzo di trasporto dell'energia meccanica in un impianto. Gli oli in commercio possono essere vegetali, sintetici (polialfolefine) o minerali (raffinazione del petrolio).

La caratteristica principale del fluido motore è di essere incomprimibile: la sua densità è indipendente dalla pressione a cui è sottoposto ed è grazie ad essa che riesce a trasmettere pressioni elevate sulla superficie del pistone, facendo traslare verso lo stampo i meccanismi di iniezione e i meccanismi di chiusura.

Per non avere delle perdite di carico è necessario mantenere le caratteristiche ideali di viscosità dell'olio: un aumento della temperatura diminuisce la viscosità e pertanto con l'olio più fluido aumentano le fughe verso il serbatoio e inoltre esso subisce delle alterazioni dovute all'alta temperatura. Il costante controllo della temperatura dell'olio permette di capire se l'apparecchiatura lavora correttamente: un anomalo incremento indica un cattivo funzionamento. La temperatura consigliata per l'azionamento delle presse idrauliche è di 38 °C per l'olio.

L'olio motore ha inoltre le funzioni di raffreddare i componenti della pressa (quindi l'unico impianto di raffreddamento installato sarà per il raffreddamento dello stampo, evitando così i consumi di acqua) e lubrificare gli elementi meccanici soggetti ad attriti e usura.

Una macchina di dimensioni medie può contenere fino al 700 lt di olio, che continua a ricircolare all'interno dei tubi ed è mantenuto ad una pressione di circa 200 bar. Dopo 8000-9000 ore di lavoro l'olio perde la sua viscosità ideale e va sostituito.

### 2.1.3. Pressa idraulica

Il motore descritto viene montato sulla pressa costituita da tutti i componenti descritti nel capitolo precedente. La potenza generata dal motore idraulico genera le forze necessarie a traslare in avanti la vite di plastificazione verso la zona di iniezione; contemporaneamente

fornisce la forza di serraggio per il gruppo di chiusura, che consente di chiudere lo stampo. Un unico impianto idraulico dotato di una centralina eroga l'energia necessaria a tutti i componenti meccanici, grazie al passaggio del fluido motori in tubazioni rivestite e isolate.

I limiti operativi di una pressa idraulica sono:

- Forza di chiusura compresa tra le 160 e le 3500 tonnellate;
- Iniezione compresa tra i 480 e i 50000 cm<sup>3</sup>.

#### 2.1.4. Vantaggi e svantaggi della pressa idraulica

Il fluido motore che scorre lungo il circuito idraulico, oltre a generare energia per l'azionamento dei componenti, ha anche la funzione di asportare calore e ridurre gli attriti tra le giunzioni meccaniche: ciò consente di non installare impianti aggiuntivi per la refrigerazione dello stampo e per la lubrificazione. Un impianto ausiliario comporta costi di investimento maggiori quindi dal punto di vista economico, l'utilizzo di olio motore risulta più economico perché un unico elemento svolge tre funzioni.

Dato lo sviluppo tecnologico che ha riguardato il settore dell'oleodinamica diversi decenni fa, si può considerare un motore a funzionamento idraulico come un dispositivo di utilizzo quotidiano, dunque i costi ad esso associati sono minori di un motore elettrico, in quanto è già stato effettuato uno studio per ridurre al minimo i costi di produzione di un motore di questo tipo; allora il costo di acquisto di un sistema di azionamento idraulico è ridotto rispetto a quello elettrico a parità di potenza.

Inoltre, per quanto riguarda i vantaggi, le presse elettriche hanno forze in gioco inferiori rispetto a quelle idrauliche a parità di motore, quindi si hanno delle pressioni di iniezione che sono ancora inferiori.

Lo svantaggio maggiore di una pressa idraulica che ci ha spinti verso un'evoluzione tecnologia del processo di stampaggio è il consumo di energia elettrica. Il motore oleodinamico è comunque collegato ad una centralina elettrica esterna, la quale lavora al massimo della sua potenza in ogni fase del processo di stampaggio: anche quando i meccanismi sono fermi (ad esempio nella fase di raffreddamento) la pressione dell'olio deve essere massima per mantenere bloccati i due semistampi. Se si verificasse una perdita di potenza lo stampo si aprirebbe, generando un pezzo stampato con difetti o un pezzo scarto. Lavorare al massimo della potenza significa avere dei costi elevati per il consumo dell'energia elettrica.

Da considerare tra gli svantaggi è anche l'utilizzo di olio motore, il quale perde le sue caratteristiche viscosi dopo 8000-9000 ore di lavoro e quindi deve essere sostituito.

L'utilizzo di olio motore, oltre ad aumentare i costi di manutenzione dovuti al ricambio di olio, ha un impatto ambientale negativo causato dallo smaltimento del fluido motore.

Inoltre gli attuatori e gli altri componenti della centralina (accumulatori, valvole, guarnizioni e filtri) devono essere posti a continua manutenzione per evitare fenomeni di trafileamento. È indispensabile la manutenzione preventiva perché, se si verificano perdite di olio non visibili ad occhio nudo, oltre a perdere efficienza nella produzione, si può anche venire meno alla sicurezza degli operatori per rischio getti altamente infiammabili. Il costo della manutenzione preventiva ha un costo che incide in maniera piuttosto significativa sul costo della produzione.

Nello stampaggio ad iniezione, sono richieste elevate velocità di avanzamento per ridurre al minimo il tempo di ciclo, ma per corse prolungate e veloci si va ad incidere negativamente sulla viscosità dell'olio e sulle perdite di carico ad essa associate. Questo fattore limitante delle perdite di carico per attrito è sempre presente in una macchina idraulica, quindi il rendimento della pressa  $\eta_{tot}$  risulterà sempre minore di una pressa elettrica a parità di potenza, andando ad incidere negativamente sulla produttività (ricordiamo che avere delle perdite di carico significa che si riduce la pressione di iniezione, con possibilità di pezzi scarto in percentuale più alta). L'energia dissipata per attrito viene trasformata in calore, che riscalda l'olio motore, perdendo le caratteristiche ideali richieste.

Si può considerare ciò che succede in un circuito idraulico, come se fosse in una "scatola nera": si ha un'idea indicativa, tramite calcoli e controllo del manometro sui valori di pressioni interne, corse di avanzamento, temperature, ecc..sono variabili che si possono calcolare con opportune formule, non sono misurate. L'impossibilità di installare dei sensori dentro i componenti idraulici implica dei valori delle variabili poco precisi, che vanno ad incidere negativamente sulle qualità di ripetibilità del processo e di controllo. Un problema riscontrato frequentemente è nella posizione di chiusura e di iniezione: un controllo di posizione non preciso non garantisce che dopo n cicli, il ciclo n+1 abbia una posizione dello semistampo mobile identica a quella iniziale, che nel caso limite può generare anche uno scarto.

Un'ultima considerazione degli aspetti negativi, ma non meno importante, riguarda la rumorosità dell'impianto: una pressa progettata con azionamento idraulico ha un livello di rumorosità elevato rispetto ad una elettrica, che spesso supera anche il livello consentito dalle normative. Un alto livello di rumorosità incide soprattutto sulla concentrazione degli operatori che devono seguire la macchina, riducendo il livello di efficienza della produzione.

## 2.2. Il motore elettrico

È un dispositivo totalmente elettrico che converte l'energia fornita dalla rete elettrica trifase in energia meccanica, assumendo il motore stesso la funzione di attuatore.

Il motore elettrico è composto da uno statore e un rotore, che prendono un ruolo diverso nel caso in cui si ha un motore asincrono o sincrono. Lo statore è la parte fissa del motore ed è dotato di due avvolgimenti per ogni fase di tensione erogata, mentre il rotore in corto circuito posto all'interno dello statore, è libero di ruotare lungo lo stesso albero di rotazione dello statore.

Nei primi dispositivi (asincroni) la caratteristica principale è che la velocità di rotazione del rotore generata dalla forza elettromotrice indotta nel traferro tra statore e rotore, è sempre minore di quella del campo magnetico B generata avvolgimenti dello statore, la quale è costante.

La potenza generata da un motore asincrono è data da:

$$P = C \cdot \omega$$

con C coppia espressa in Nm e  $\omega$  è la velocità di rotazione angolare in rad/s

In un motore sincrono, si verifica la condizione di sincronismo tra rotore e statore: entrambi i componenti girano sullo stesso albero di rotazione alla medesima velocità angolare  $\omega$ , che è data dalla frequenza di rete (si ricorda che  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  è la frequenza di rete erogata). In questo caso non si presentano più fenomeni di scorrimento, cioè la differenza tra la velocità relativa del campo magnetico generato dagli avvolgimenti dello statore e la velocità relativa del rotore.

Si preferisce utilizzare la seconda categoria di motori per le prestazioni migliori in merito a precisione, affidabilità e coppia; inoltre sono sistemi meno rumorosi e con vita utile dei componenti meccanici più lunga (valido per motori senza spazzole, brushless).

I dispositivi sincroni utilizzati nello stampaggio ad iniezione possono essere di due tipi: i **motori a cinghie** o i **motori diretti** (lineari).

I sistemi tradizionali a cinghie di trasmissione sono costituiti da motori montati all'esterno della macchina (in posizione più elevata della parte di iniezione) collegati alla vite a ricircolo di sfere da un riduttore di velocità. Il riduttore è un meccanismo in grado di variare il rapporto di velocità e il rapporto di coppia tramite l'utilizzo di due o più ruote dentate che riescono a trasferire la potenza da un motore di tipo rotativo alla parte del macchinario che dovrà traslare.

Prendiamo in esame la formula  $P = C \cdot \omega$  che calcola la potenza in uscita dall'utenza; se si desidera aumentare la coppia, a parità di potenza erogata, basta ridurre la velocità angolare. Si prende una seconda ruota che funge da riduttore con dimensione pari a metà della prima ruota, allora la velocità  $\omega_2$  sarà pari a  $\frac{1}{2}\omega_1$ . Se eguagliamo  $C_1\omega_1 = C_2\omega_2$  (supponendo che il motore eroga la stessa potenza), troveremo un valore del momento  $C_2 = 2C_1$ .

Il sistema tradizionale con riduttore non è il motore più vantaggioso perché ha bisogno di molta manutenzione e lubrificazione: se si verifica usura delle cinghie di trasmissione, è soggetto a perdite di potenza nella fase di trasmissione del moto. Inoltre ha un impatto negativo sull'ingombro e sulla rumorosità del macchinario: un motore a due livelli (con riduttore) comporta un maggior spazio occupato all'interno del layout aziendale.

Si preferisce il motore diretto rispetto a quello a cinghie in quanto viene eliminato il riduttore che andava a gravare sulla manutenzione, quindi con il rischio più elevato di usura, maggiore ingombro e minore flessibilità nel montaggio.

I sistemi diretti sono dispositivi tecnicamente più innovativi: la loro introduzione nel mondo dello stampaggio plastico è avvenuta solo qualche anno fa, infatti non è ancora stato raggiunto il livello di perfezione dei motori diretti.

I motori diretti realizzano il moto rotativo senza la trasmissione meccanica. Sono dispositivi sincroni trifase ad eccitazione permanente e, a differenza dei motori tradizionali a trasmissione, sono costituiti soltanto da un rotore ed uno statore: il riduttore di velocità e le cinghie sono state eliminate. È il servomotore stesso che genera l'energia meccanica necessaria per il carico. L'assenza dei componenti meccanici permette di superare dei limiti tecnologici quali:

- Si annullano i fenomeni di usura, riduzione degli attriti, minori difetti ciclici del moto, minori oscillazioni e minore inerzia;
- Bassa rumorosità dovuta al raffreddamento in acqua e non più ad aria;
- Aumento dell'efficienza energetica del motore e del rendimento di trasmissione del moto. Se consideriamo idealmente un rendimento del motore diretto  $\eta_{dir} = 1$ , il rendimento di uno stesso motore tradizionale a cinghie, a parità di potenza erogata sarà  $0,8 < \eta_{ind} < 0,9$ ;

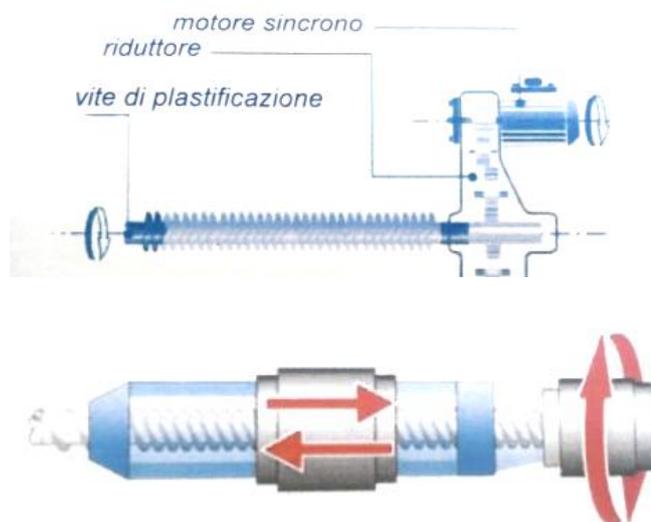


Figura 21 – nella figura sopra è riportato lo schema di un motore con riduttore, nella figura in basso un motore diretto [5]

- Minore ingombro: un motore diretto non è più disposto su due livelli, bensì nel piano di plastificazione della vite. Avere meno ingombro significa avere più spazio per l'installazione di altri macchinari nello stesso luogo, ed un minore costo di montaggio del motore, data la struttura più semplice;
- Minore manutenzione;
- Controllo della posizione: a differenza del sistema di controllo di un motore tradizionale, basato sulle condizioni meccaniche del riduttore (come giochi, attriti, geometrie), il controllo di un sistema diretto ad anello chiuso permette di stabilire dei limiti ad alta precisione ed invalicabili per quanto riguarda la posizione.

Le prestazioni di un motore diretto sono influenzate da due sole variabili: la coppia motrice e il momento di inerzia rispetto all'asse rotante. Si nota che, a differenza del motore tradizionale, nel calcolo delle prestazioni non sono più presenti le variabili fisiche che alterano le capacità del motore.

Per contro, nel motore diretto, si ha un elevato surriscaldamento per effetto Joule: è necessario allora installare un impianto di refrigerazione ausiliario per il motore.

È importante distinguere le scelte tecnologiche per la costruzione delle presse fatte dal mercato europeo piuttosto che quello giapponese: il primo si sta orientando verso una scelta di motori diretti, gli ultimi brevettati sono i Torque; mentre in Giappone preferiscono un sistema tradizionale a cinghia.

Come si può notare dalla figura 22, rispetto ad una pressa idraulica che genera le stesse pressioni di iniezione e di chiusura, sono necessari più motori: due posizionati nell'unità di plastificazione (uno per la carica e uno per l'iniezione) e due nel gruppo di chiusura, rispettivamente per la chiusura stessa e per contrastare la pressione di iniezione. L'impatto economico dei quattro servomotori elettrici è notevole in fase di investimento del macchinario, ma consente un rapido recupero (*pay-back period*) grazie all'elevata produzione dovuta ad una massima efficienza e ai costi di manutenzione preventiva praticamente nulli.

Per la conversione del moto rotatorio generato dal motore diretto o a cinghie, si posizionano tra la vite di plastificazione e il motore stesso le viti a ricircolo di sfere, che appunto trasformano il moto rotatorio in lineare e fanno avanzare la vite verso l'ugello per l'iniezione. Nelle presse tecnologicamente più innovative sono montate le nuove viti a ricircolo di rulli, le quali hanno una maggior superficie di contatto che consente di trasportare una maggiore quantità di energia, minimizzando l'usura dei componenti meccanici.

Una caratteristica che può incidere a favore di una pressa totalmente elettrica è la manutenzione: l'impianto elettrico montato non necessita della stessa manutenzione

preventiva di una centralina idraulica, quindi nel caso ideale si possono considerare i costi di manutenzione praticamente nulli. Di contro, se si dovesse guastare un componente di uno dei servomotori è necessario sostituire tutto il motore, che andrebbe a incidere negativamente nel bilancio annuale.

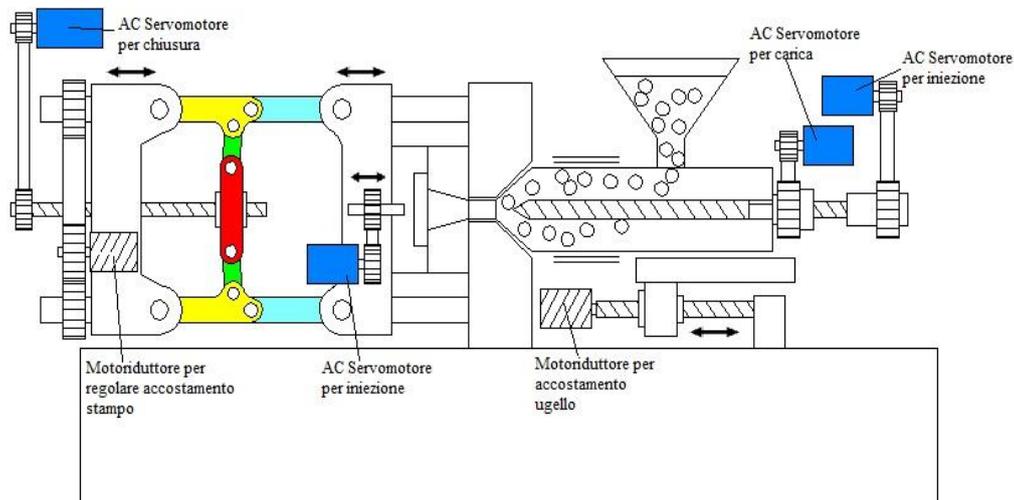


Figura 22 - schema di una pressa elettrica [8]

Un'altra caratteristica importante delle presse elettriche è il sistema di controllo della velocità di avanzamento: grazie al controllo ad anello chiuso con encoder ottici posizionati all'interno dell'unità di iniezione si riesce a fare una "radiografia" interna alla macchina; misurando in maniera precisa i valori di pressione, temperatura e velocità in ogni punto. Questa caratteristica è di fondamentale importanza per quanto riguarda l'efficienza della produzione, perché garantisce un'ottima ripetibilità del ciclo di produzione grazie alla precisione assoluta della posizione degli stampi ed alla conoscenza precisa delle variabili interne durante ogni fase del processo.

### 2.2.1. Pressa elettrica

Come nel caso delle presse idrauliche, anche le presse con motori diretti o tradizionali con cinghie, sono costituite da tutti i componenti descritti nel capitolo precedente. Si differenziano dalla presse idrauliche per il sistema di azionamento degli elementi meccanici, che è totalmente elettrico.

I limiti operativi di una pressa elettrica sono:

- Forza di chiusura compresa tra le 100 e le 450 tonnellate;
- Iniezione compresa tra i 480 e i 1300 cm<sup>3</sup>.

### 2.2.2. Vantaggi e svantaggi della pressa elettrica

Gli svantaggi descritti prima per una pressa idraulica sono i punti di forza di una pressa elettrica: prima di tutto bisogna evidenziare il risparmio energetico pari circa al 50% di energia elettrica; in secondo luogo l'eliminazione dei costi di manutenzione. A seguire si hanno notevoli miglioramenti su: efficienza della produzione, ripetibilità, precisione, rumorosità, riduzione del tempo di ciclo, qualità del manufatto superiore.

Ovviamente anche le presse elettriche presentano degli svantaggi, che possono incidere pesantemente sulla scelta di un macchinario elettrico: a causa della sofisticata tecnologia utilizzata per la costruzione della pressa (soprattutto per i motori diretti), dei costi per la progettazione e per la realizzazione dei componenti, hanno un costo di investimento decisamente più elevato di una pressa idraulica che genera la stessa potenza.

Un secondo punto a sfavore è legato alla manutenzione straordinaria: in caso di guasto del motore, se prima era possibile sostituire lo specifico componente (ad esempio un accumulatore) con queste presse totalmente elettriche si è obbligati a cambiare l'intero motore, con costi di manutenzione decisamente più elevati.

Inoltre, un limite che può incidere in alcuni casi è la potenza erogata: a parità di volume del motore, le presse elettriche non sono ancora in grado di eguagliare quelle idrauliche in termini di potenza.

### 2.2.3. Il risparmio energetico

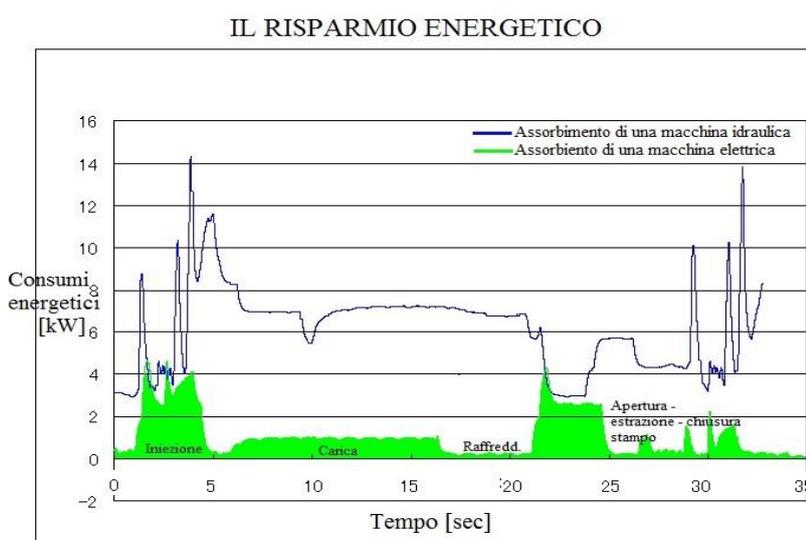


Figura 23 - risparmio energetico di una pressa elettrica e idraulica a confronto [8]

È il maggiore punto di forza di una pressa elettrica: in una stessa macchina ad avviamento idraulico, l'olio che serve per trasmettere l'energia deve lavorare sempre al massimo della pressione, quindi il consumo di energia elettrica da parte del motore che eroga potenza a tutto il circuito idraulico è al massimo; in

una pressa elettrica invece, la potenza erogata è massima solamente nelle fasi di apertura e

di chiusura dello stampo e di iniezione. Nelle altre sequenze di mantenimento si può considerare il consumo energetico praticamente nullo.

Se si calcola la media della potenza istantanea in entrambe le macchine è facile vedere come in una pressa idraulica la potenza erogata risulta sempre massima (che si traduce in un massimo consumo di energia elettrica), mentre in una pressa elettrica la potenza media erogata risulta circa il 50% in meno.

Inoltre, in fase di frenata del sistema di chiusura, si ha un recupero dell'energia che viene restituita sotto forma di corrente elettrica.

La soluzione con motore elettrico ha permesso di eliminare dalle voci del bilancio il consumo di energia elettrica come costo predominante. A titolo di esempio, in base figura 23, vediamo che il consumo medio di una macchina idraulica è di circa 6,5 kWh, mentre per la stessa pressa, che produce lo stesso manufatto ma ad azionamento elettrico si ha un consumo medio di circa 2 kWh.

#### 2.2.4. Riduzione del consumo di acqua/olio

Le presse idrauliche hanno bisogno di olio motore per trasmettere energia, lubrificare e refrigerare i componenti meccanici del macchinario. In genere, una pressa contiene circa 700 litri di fluido motore, il quale deve essere rigenerato con olio nuovo ogni 8000 ore di lavoro. Considerando che il fluido motore ha un costo di circa 3,40 € per litro, alla fine dell'orizzonte temporale di studio economico,

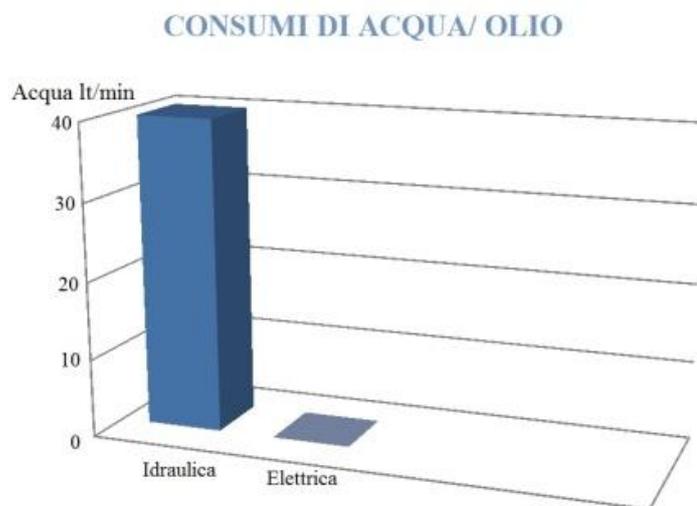


Figura 24 - risparmio idrico di una pressa elettrica e idraulica a confronto [8]

risulta che ci sarà una sostanziosa parte dei costi dedicata al consumo dei fluidi per il funzionamento efficiente della macchina.

Ciò non avviene per le presse ad azionamento elettrico: la trasmissione del moto ha luogo grazie all'energia elettrica convertita in meccanica. Non c'è il fluido motore che scorre all'interno del serbatoio. Tuttavia, la pressa avrà bisogno di un piccolo impianto esterno per la refrigerazione degli stampi (solitamente ad acqua) posizionato nel gruppo di chiusura. Inoltre è sempre presente un impianto per la lubrificazione delle giunzioni e per il funzionamento degli estrattori. Per il funzionamento di questi ultimi componenti è

indispensabile avere un piccolo serbatoio con fluido motore: l'olio in pressione ottenuto spinge in avanti i pistoni indispensabili ad azionare gli estrattori verso il centro dello stampo. In commercio ci sono anche soluzioni con estrattori pneumatici ad aria, ma sono meno precisi di quelli idraulici. Si può quindi affermare che, anche se le presse elettriche hanno bisogno di un impianto ad acqua e di olio ausiliario, le portate di acqua e fluido necessari al funzionamento sono trascurabili rispetto a quelle di una pressa idraulica.

Si evidenzia inoltre che nel caso si scelga una pressa con motore diretto, serve un impianto per asportare il calore generato per effetto Joule anche nella zona di iniezione, cosa non necessaria per le presse a motore tradizionale con riduttore.

Come spiegato nell'intervista da parte dell'azienda produttrice di software di supervisione di Piovan per la rivista Tecnoplast, per monitorare i consumi energetici ed idrici sono presenti nel mercato diversi software come ad esempio l'*Energy Consumption Monitor* di Winfactory. Questo software permette di misurare l'effettivo utilizzo di energia, sia della singola macchina che di uno specifico impianto, il quale fornisce grafici con consumi reali in watt. Il fatto di conoscere i dati dei consumi è da ritenersi un vantaggio, in quanto permette di valutare come intervenire in modo corretto per ridurre al minimo gli sprechi in base alla produzione aziendale [9].

#### 2.2.5. Il punto di forza della pressa elettrica: la precisione

La precisione assoluta si è ottenuta nelle presse elettriche grazie all'introduzione dei sistemi informatici nel macchinario:

- **Sistema di controllo CNC.** Fino agli anni '80, i dispositivi CNC erano montati su macchinari per le lavorazioni ad altissima precisione. Ad oggi vengono montati sulle nuove presse tecnologicamente avanzate, come le presse elettriche. Di fatto, le presse dotate di *Computer Numerical Control*, sono considerate a tutti gli effetti come delle macchine utensili: non è più necessario impostare i profili di velocità di apertura e chiusura, basta impostare solo la quota e la velocità; il CNC provvederà a raggiungere la quota impostata con la velocità corretta e la precisione assoluta. I sistemi a controllo CNC garantiscono un'efficienza di produzione massima, precisione assoluta delle posizioni e affidabilità;
- **Cavity-pressure.** Vengono posizionati dei sensori di pressione diretti o indiretti nello stampo: i diretti sono inseriti all'interno dello stampo; gli indiretti, più sofisticati e utilizzati per la produzione di manufatti di piccole dimensioni, vengono posizionati dietro il perno espulsore. Misurare la pressione all'interno di tutte le cavità dello

stampo (cioè l'andamento della pressione in tutte le figure) è sinonimo di qualità e di ottimizzazione del processo di produzione su larga scala. Consente di avere informazioni importanti in merito al processo di stampaggio, al controllo della produzione e dell'analisi della qualità del prodotto, è come se si riuscisse a vedere cosa succede dentro lo stampo. Misurare la pressione in cavità ha un doppio vantaggio: si passa in modo corretto dalla pressione di iniezione a quella di mantenimento, stabilizzando il processo di stampaggio; consente di monitorare la pressione in cavità per avere la certezza che ogni figura sia riempita in modo corretto e funzionale, portando la produzione al massimo dell'efficienza. I sistemi di controllo di pressione utilizzano delle curve per l'andamento della pressione in ogni cavità segnalando ogni eventuale irregolarità. I sensori sono un componente indispensabile per le aziende che operano in settori con caratteristiche qualitative dei manufatti piuttosto stringenti: nel settore automobilistico si deve garantire, oltre alla massima precisione, la stabilità dei processi produttivi e la loro tracciabilità. Il controllo di pressione comporta dei costi di acquisto dello stampo più elevati, che però vengono ripagati da un'elevata qualità del prodotto ed efficienza del processo produttivo (intervista a Patrick Freiherr von Twickel, Neo Plastic, nella rivista *Tecnoplast*, Ottobre 2013) [10].

#### 2.2.6. L'unità di termoregolazione

Un articolo riportato nella rivista *Tecnoplast* [11], descrive l'importanza che la temperatura dello stampo, della vite e del cilindro hanno sulle qualità del prodotto e sul tempo di ciclo. Se si vuole puntare alle caratteristiche massime del manufatto e della produttività è consigliabile installare uno dei seguenti sistemi di controllo della temperatura:

- Controllo del fluido di scambio termico. È il metodo più comunemente usato: si misura la temperatura in ingresso e in uscita del fluido refrigerante dallo stampo. Per manufatti che richiedono caratteristiche meccaniche stringenti la variazione di temperatura deve essere di 1 °C, mentre per manufatti semplici si ha uno scostamento di 3 °C;
- Controllo dello stampo. Metodo che prevede l'impiego di sensori di temperatura ausiliari nello stampo, necessario quando è richiesto un'uniformità di temperatura;
- Controllo a cascata. È una combinazione dei due controlli sopra elencati: vengono analizzati sia gli scostamenti di temperatura del fluido refrigerante che le temperature dello stampo.

Gli obiettivi definiti per l'unità di termoregolazione sono quello di riscaldare lo stampo alla temperatura di lavoro, mantenerla costante ed infine analizzare le temperature minime e massime rilevate sull'impronta. Un controllo accurato della temperatura permette di ottimizzare le caratteristiche meccaniche del manufatto come: i ritiri, le distorsioni, lo scorrimento e il tempo di ciclo.

Tra i vantaggi di un corretto sistema di controllo della temperatura si riscontra: la riduzione degli scarti, grazie al miglior riempimento della cavità; una migliore efficienza; una minore usura dello stampo; diminuzione delle tensioni superficiali del manufatto; le tolleranze sono ridotte e si ha una migliore qualità superficiale.

Si tende ad usare sempre l'acqua come fluido refrigerante perché, nonostante possa raggiungere una temperatura massima di 90 °C (180 °C se si utilizza acqua pressurizzata), ha un coefficiente di scambio termico migliore dell'olio. Se le temperature del fluido a contatto con lo stampo dovessero superare i valori limite sopra citati si usa olio diatermico per asportare calore dallo stampo, soluzione limitativa quando si opera in campo alimentare o farmaceutico.

Il sistema di termoregolazione Regloplas utilizza acqua pressurizzata con fluido per la termoregolazione per soddisfare alcune fasi del processo come la sterilizzazione del materiale ad una temperatura di 140 °C. Aumentando la pressione dell'acqua aumenta anche la portata erogata dalla pompa: si può arrivare anche a valori di acqua di 240 l/min ad una pressione di 4,6 bar garantendo una rapida circolazione del fluido, aspetto vantaggioso nell'asportazione di calore.

### 2.2.7. Riduzione del tempo di ciclo

Un ulteriore vantaggio delle presse elettriche riguarda la riduzione del tempo di ciclo del processo: in una pressa elettrica, grazie al controllo preciso delle posizioni, dell'avanzamento della vite e della pressione si ha un'ottimizzazione dei processi che permettono di ridurre il tempo in ogni fase di processo, con una conseguente riduzione generale del tempo totale di produzione per stampata.

Nella maggior parte dei casi, il tempo di raffreddamento del polimero nello stampo non coincide con il tempo di plastificazione necessario per il ciclo successivo: ad esempio, per processi che impiegano elevati volumi di materiale, ma con spessori dello stampo piccoli, si è nella condizione in cui il tempo necessario al raffreddamento è minore del tempo impiegato per il ciclo successivo. Osservando il grafico riportato in alto in figura 25 si vede che, nel caso in cui si operi con una pressa idraulica che non consente la sovrapposizione delle operazioni, non si ha un utilizzo efficiente del macchinario: una volta terminato il raffreddamento, non si può effettuare subito l'apertura e l'estrazione del prodotto finito,

poiché bisogna aspettare che la vite termini la fase di plastificazione. La macchina si trova in una fase di inoperatività che può essere migliorata.

Per ottimizzare il tempo di ciclo, si possono sovrapporre alcune delle fasi del processo per ridurre al minimo i tempi morti. In particolare:

- Nella fase di iniezione e chiusura si usa il **pre-iniettore**, un componente che consente di avviare l'iniezione prima che sia raggiunta la forza totale di chiusura dello stampo: in uno stampo con canali di alimentazione tradizionali è possibile far fluire il polimero fuso negli stessi anche quando i due semistampi non sono completamente chiusi. In pratica, il blocco dello stampo avviene simultaneamente con l'iniezione;

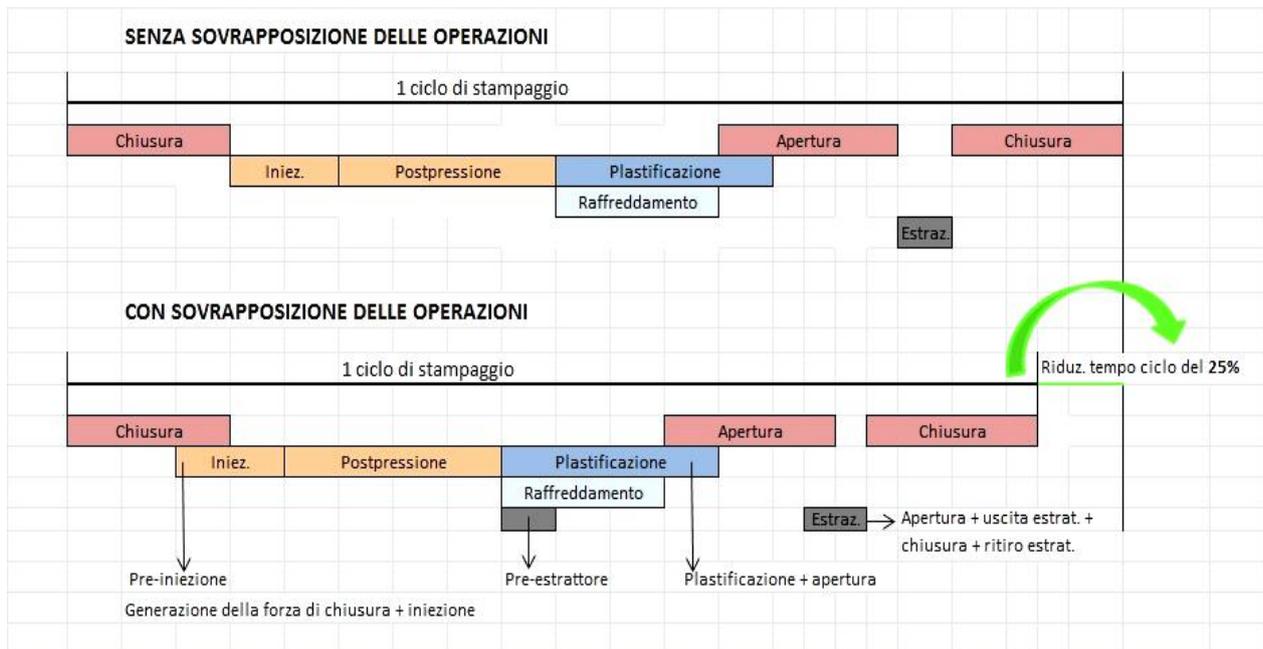


Figura 25 - tempo di ciclo senza sovrapposizione delle operazioni e con sovrapposizione [12]

- Ultimata la fase di mantenimento, il **pre-estrattore** effettua la smatterozzatura all'interno dello stampo. Successivamente, quando il pezzo è completamente raffreddato, si avviano gli estrattori a stampo chiuso garantendo comunque che il manufatto sia completamente raffreddato. Per ridurre il tempo si effettua lo sblocco dei due semistampi nel momento in cui inizia il raffreddamento.

Grazie alla simultaneità permessa da componenti tecnologicamente più sofisticati si può risparmiare circa il 25% sul tempo di ciclo per ogni stampatura. Questo vantaggio permette quindi di avere una produttività più elevata a parità di potenza erogata dalla pressa e nello stesso orizzonte temporale studiato.

Si deve far notare che solo le presse elettriche possono effettuare la sovrapposizione delle fasi di ciclo: in una pressa idraulica il controllo dei parametri durante il processo avviene in

maniera meno precisa che nelle presse elettriche, mentre per consentire la simultaneità delle operazioni è richiesta la massima precisione.

Anche in assenza di sovrapposizione delle fasi, le presse elettriche vantano di un minor tempo di ciclo rispetto a quelle idrauliche (anche di qualche decimo di secondo) dovuto all'aumento dell'efficienza degli organi della macchina.

### 2.2.8. Applicazioni

I manufatti prodotti dallo stampaggio ad iniezione di materie plastiche sono destinati ai più svariati settori industriali, tra i quali si disgiungono maggiormente: automotive, il settore medicale, imballaggio, stampaggio tecnico e teletronics.

L'applicazione in ambito automobilistico produce componenti plastici per le macchine come cofani, freni o giunzioni interne. Il settore automotive impone delle stringenti condizioni di qualità del prodotto finito per garantire la massima sicurezza nella guida degli utilizzatori finali: avere un'ottima qualità è sinonimo di proprietà meccaniche del prodotto finito elevate. Per garantire che siano rispettati i limiti imposti dalle normative si devono scegliere presse che producono prodotti finiti ad elevate caratteristiche meccaniche le quali, in base alle considerazioni dei paragrafi precedenti, potrebbero essere ad azionamento elettrico.

Per quanto riguarda il settore farmaceutico e medicale, le normative impongono un'assoluta sterilità dei prodotti finiti (fili per sutura, contenitori, dosatori). In una semplice pressa idraulica, l'olio motore utilizzato sia per la trasmissione dell'energia che per la lubrificazione, ha delle piccole fuoriuscite che potrebbero sporcare il manufatto. Di conseguenza le macchine ad azionamento idraulico non possono essere idonee per la produzione nel settore medicale, sono necessarie le presse elettriche. Inoltre i prodotti utilizzati in questo ambiente devono avere una tracciabilità del processo, cosa garantita con l'utilizzo di un sistema di controllo di tipo CNC che registra tutti i record delle variabili in ogni fase del ciclo e li trasferisce nei PC aziendali.

Nel settore packaging gli articoli prodotti possono essere anche voluminosi, quindi con spessori piuttosto elevati. L'aumento di volume comporta delle forze di iniezione necessarie maggiori, che come è già stato detto prima non sono ancora raggiunte in maniera ottimale dalle presse elettriche. La pressione necessaria per ora è raggiunta soltanto dalla pressa ad azionamento idraulico, che riesce a generare una potenza maggiore e più stabile quando si opera con tonnellaggi così elevati. Una soluzione che consente sia di avere dei consumi minori, che una forza di iniezione elevata è l'utilizzo di presse ibride: in questa tipologia di presse l'azionamento dei motori per la chiusura dello stampo e per la carica sono elettrici, mentre il motore per la vite punzonante rimane idraulico.

I componenti elettronici (industria teletronics) sono di dimensioni ridottissime e richiedono un'elevata precisione del processo, ottenuti grazie a presse elettriche di piccolo tonnellaggio.

### 2.3. La pressa ibrida

In alcuni casi di stampaggio tecnicamente più complesso può accadere che non risulta consigliabile produrre il manufatto né con una pressa ad azionamento idraulico, né con una elettrica. Per risolvere questa esigenza, è stata introdotta alla fine degli anni 2000 un compromesso tra i due macchinari che permette di combinare le caratteristiche di entrambe le presse: nasce la macchina ibrida.

La differenza fondamentale con le altre due è il tipo di azionamento. Nel gruppo di iniezione è presente un motore elettrico per l'azionamento delle viti a ricircolo di rulli e un motore idraulico per l'azionamento della vite punzonante; nell'unità di chiusura invece sono posti due motori per la chiusura ad azionamento elettrico.

Grazie all'utilizzo dei servomotori elettrici la macchina garantisce comunque un'ottima riduzione del consumo energetico (circa il 30% - 40%), con recupero di energia in fase di frenata. Mantiene inoltre tutte le qualità di una pressa elettrica quali: precisione centesimale, ottimizzazione dei tempi di ciclo, elevate velocità, controllo numerico semplice e intuitivo, ridotta rumorosità, ripetibilità del processo, efficienza. L'aspetto negativo delle presse ibride risulta essere lo stesso delle macchine idrauliche: un aumento dei costi legati alla manutenzione preventiva causati dall'introduzione della centralina oleodinamica per il motore idraulico e una riduzione della pulizia della macchina, causata dalla presenza dell'olio. Perciò una macchina ibrida, come del resto una idraulica, non sarà indicata per la realizzazione di prodotti farmaceutici.

Un'analisi che confronta le presse ibride da quelle idrauliche riporta nella tabella i dati relativi al consumo di energia elettrica [5]:

	<b>eKW 38 Pi/2200 ibrida</b>	<b>KW 38 Pi/2200 idraulica</b>
Consumi energetici	53,5 kWh	70 kWh
Consumi specifici	0,71 kWh/kg	0,93 kWh/kg

È facile quindi notare le differenze che caratterizzano il tipo di pressa:

- Pressa idraulica: unico motore idraulico che aziona l'unità di iniezione e il gruppo di chiusura, collegato ai vari organi meccanici da tubazioni rivestite;

- Pressa elettrica: due motori elettrici per il gruppo di iniezione (uno per le viti a ricircolo di sfere/rulli, uno per la vite di plastificazione) che possono essere diretti o tradizionali a cinghie, due motori brushless per il gruppo di chiusura;
- Pressa ibrida: è una combinazione delle precedenti. Un motore elettrico diretto o tradizionale per l'azionamento della vite a ricircolo di rulli/sfere nell'unità di iniezione, un motore idraulico per la vite punzonante, mentre nel gruppo di chiusura ci sono due motori brushless per la corsa dello stampo, per un totale di tre motori elettrici e uno idraulico.

## 2.4. I casi studio

### 2.4.1. La scelta di acquistare una pressa elettrica

Verve SpA, un'azienda made in Italy di Varese ha rilasciato un'intervista per la rivista *Tecnoplast* in cui spiega le motivazioni della sua scelta orientata verso una tecnologia full electric [13].

Il titolare dell'azienda a conduzione familiare spiega come l'impresa, nata alla fine degli anni '50 si è evoluta nel settore delle materie plastiche, passando dalla realizzazione della macchina a soffiaggio per la produzione di giocattoli allo stampaggio ad iniezione, ottenendo numerosi brevetti per il soffiaggio con due o tre colori. Nel corso degli anni lavorativi si è affermata nel mondo della cosmetica grazie alla collaborazione con Avon, diventando fornitore di packaging per la ditta a livello mondiale e imparando a gestire un progetto di produzione completo; tra i giochi prodotti nel corso degli anni si può ricordare uno dei più famosi, introdotto nel mercato nel 1971: il "Clic Clac".



Figura 26 - prodotto di punta dell'azienda Verve degli anni '70: il Clic Clac.

Ad oggi l'azienda dispone di un'officina meccanica per la realizzazione di stampi dedicati ad ogni prodotto differenziato (customizzato) e possiede anche di un'area operativa in cui si realizzano i manufatti veri e propri. Negli ultimi anni però, le richieste dei clienti sono cambiate: le scelte sono più propense per un prodotto standard che poi viene differenziato dai clienti stessi in base al proprio marketing a fronte di un investimento minore: la produzione aziendale si basa sulla realizzazione di giocattoli, prodotti più stagionali, che sono dettati dalla moda e sulla cosmetica, packaging più standardizzati.

Inoltre, sempre negli ultimi anni, hanno stretto un rapporto di collaborazione con Procter & Gamble (nello specifico con il marchio di deodoranti ambientali Ambi Pur) con l'obiettivo di migliorarne il packaging che presentava alcuni difetti derivati dal sistema produttivo precedente. Al fine di migliorare le qualità finali del manufatto sono stati effettuati degli studi progettuali che hanno coinvolto sia l'aspetto tecnologico dei contenitori che il servizio al cliente. Per questo motivo l'azienda si è indirizzata verso l'acquisto di una pressa per lo stampaggio completamente elettrica dedicata al miglioramento del prodotto e per rendere il processo automatizzato. La scelta è stata orientata verso un macchinario con tecnologia giapponese: Sumitomo (SHI) Demag IntElect da 450 tonnellate (4500 kN di forza di chiusura).

I punti di forza della pressa sono:

- L'assemblaggio della pressa viene effettuato direttamente "in house";
- L'assenza di acqua di raffreddamento;
- La rigidità e la precisione degli organi di trasmissione con riduttore;
- L'affidabilità e robustezza del macchinario;
- L'utilizzo della doppia ginocchiera è dotata di un'eccellente cinematica e il controllo delle rampe di accelerazione e di decelerazione avviene in tempo reale con recupero energetico;
- La velocità di iniezione e la capacità di sopportare elevate pressioni di mantenimento per tempi lunghi;
- Il sistema di controllo con assistenza in rete da parte dell'azienda distributrice italiana Macam.

Verve si è affidato ad una miglior proposta per quanto riguarda il rapporto qualità-prezzo con l'utilizzo di una macchina innovativa. La produzione del contenitore per deodorante ambientale è passata da 50 pezzi al minuto a 100 grazie all'aumento dell'efficienza del motore elettrico e alla riduzione sostanziale del tempo di ciclo. Non è neanche da trascurare l'impatto ecologico di un motore elettrico: l'installazione di impianti fotovoltaici integrata alla macchina elettrica ha un risparmio energetico notevole.

#### 2.4.2. La scelta di produrre una pressa elettrica (Italia)

BMB è un'azienda bresciana leader nella produzione di impianti per lo stampaggio nata nel 1967 dal fondatore E. Bugatti; l'obiettivo fondamentale del titolare dell'azienda è da sempre quello di soddisfare ogni esigenza di stampaggio. Negli ultimi dieci anni l'azienda si è

dedicata a progettare macchine dedicate ad abbattere i costi: non tanto il costo della macchina in sé ma i costi di esercizio derivati dal suo utilizzo.

L'introduzione delle prime presse elettriche (inizi degli anni 2000) non soddisfaceva le esigenze dei clienti in merito alle velocità di iniezione. Il problema è stato risolto con l'introduzione di un compromesso: una macchina ibrida dotata di motore elettrico per la carica nel gruppo di iniezione, due motori elettrici per la chiusura e un unico motore idraulico per la vite di plastificazione. Questa soluzione ha avuto un notevole successo nel settore imballaggio per parecchio tempo e, ancora oggi i produttori di manufatti plastici hanno difficoltà ad abbandonare una pressa ibrida per introdurre una totalmente elettrica.

L'innovazione tecnologica, la tendenza ad investire in fonti rinnovabili ed ecologiche e la volontà di risparmiare sui costi di esercizio ha orientato l'azienda italiana a sviluppare una macchina completamente elettrica.

La risposta ai desideri del titolare BMB è arrivata negli ultimi anni in cui hanno presentato la nuova linea prodotta nel mercato: la eKW 38Pi/2200 da 380 tonnellate totalmente elettrica. Questa pressa è dotata di tre motori Torque della Siemens che azionano il gruppo di iniezione e due motori brushless per il gruppo di chiusura. L'impatto fondamentale di una pressa elettrica è la rimozione dell'impianto frigorifero che raffredda l'olio motore e la riduzione drastica dell'impianto idraulico (si ricorda che è presente una piccola centralina ad olio che serve per azionare gli estrattori). Si elimina quindi tutta la manutenzione preventiva che risulta obbligatoria in caso di utilizzo di una pressa funzionante ad olio motore, che si traduce in una riduzione dei costi di esercizio nel bilancio [14].

Componenti innovativi della pressa eKW:

- Gruppo di chiusura. Dotato del brevetto di chiusura della ditta stessa: il KW. Nelle presse senza il brevetto KW, la pressione di iniezione è esercitata al centro dei piani dello stampo, ma la pressione generata dal gruppo di chiusura viene applicata ai lati del semistampo mobile, in corrispondenza delle colonne; se si lavora con presse di grandi dimensioni (con un passaggio tra le colonne ampio) l'applicazione della forza generata dall'iniezione al centro dello stampo provoca una flessione che danneggia sia il manufatto in lavorazione, sia il semistampo mobile. Il brevetto BMB serve proprio a risolvere questo problema: viene applicata una forza al centro del piano che serve a contrastare la forza di iniezione della vite, pertanto la forza di chiusura viene

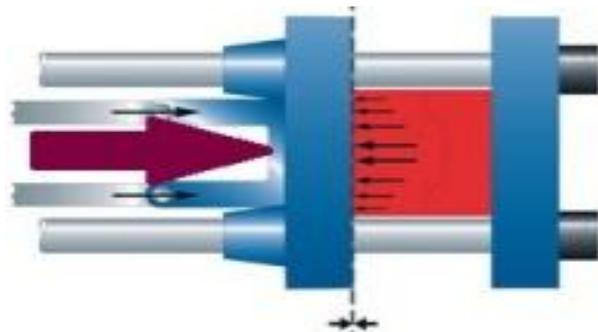


Figura 27 - chiusura KW brevettata BMB [5]

applicata direttamente al centro dello stampo (e non ai lati come nelle presse senza brevetto). Inoltre garantisce un perfetto parallelismo dei piani, un ingombro ridotto mantenendo comunque lunghe corse di apertura;

- Gruppo di iniezione. La pressa è dotata di tre motori Torque per il gruppo di iniezione: due azionano le viti a ricircolo di rulli poste alle estremità, uno aziona la vite di plastificazione posta al centro. La configurazione a tre motori agevola il raggiungimento di alte velocità di plastificazione, riducendo il tempo delle prime fasi del processo ed inoltre aumenta il rendimento energetico.
- Sistema di controllo: il sistema di controllo CNC per macchine utensili consente di raggiungere precisioni di stampaggio centesimali senza dover ridurre la velocità dei movimenti. Il sistema rende facile la registrazione dei valori delle variabili e la ricerca delle quote impostate, le quali tra l'altro sono soltanto tre da inserire: posizione, velocità e forza.

#### Vantaggi:

- Versatilità. La pressa è destinata a clienti che devono produrre elevati quantitativi di prodotti, per chi ha carichi di lavoro importanti o per chi è sensibile all'impatto ambientale, ma anche per realizzare stampi tecnici più precisi e costanti. Una pressa elettrica può essere adattata più facilmente secondo le esigenze del produttore;
- Minori emissioni sonore;
- Riduzione del consumo di olio quasi totale;
- Non si effettua manutenzione preventiva;
- Migliore pulizia all'interno della macchina;
- Alti livelli di velocità, di precisione, miglioramento nelle impostazioni delle quote per quanto riguarda gli azionamenti della macchina;
- Risparmio energetico compreso tra il 40% e il 60%. Se consideriamo la linea da 380 tonnellate eKW (elettrica) e la pressa idraulica corrispondente i valori dei consumi energetici rilevati sono [5]:

	<b>eKW 38 Pi/2200 full electric</b>	<b>38 Pi/2200 idraulica</b>
Consumi energetici	31 kWh	70 kWh
Consumi specifici	0,41 kWh/kg	0,93 kWh/kg

### 2.4.3. La scelta di produrre una pressa elettrica (Giappone)

Negli ultimi anni molte aziende italiane ed europee hanno dato inizio a rapporti di collaborazione con produttori di presse giapponesi: un esempio di questo fenomeno è rappresentato da Windsor, collaboratore ufficiale per l'Europa di JSW (The Japan Steel Works). JSW è una società giapponese che opera nel settore dello stampaggio di materie plastiche da oltre 50 anni e, a partire dalla fine degli anni '80 si è lanciata verso la costruzione di macchinari completamente elettrici. Come in altri settori, anche nello stampaggio di materie plastiche si nota un anticipo di quasi dieci anni rispetto a quello europeo sul progresso tecnologico del Giappone. L'evoluzione della tecnologia dello stampaggio giapponese è stata tale da portare le macchine full electric non solo a dominare Giappone, Asia e USA per un 70%, ma anche a coinvolgere il mercato europeo soprattutto negli ultimi anni [15].

Le presse elettriche realizzate in Giappone presentano delle caratteristiche costruttive diverse rispetto a quelle made in Italy:

- Gruppo di chiusura. È stato spiegato prima quali sono i limiti di una chiusura a ginocchiera con un passaggio tra le colonne ampio. Per ovviare al problema della flessione dei piani, JSW ha ideato un brevetto che prevede l'applicazione della forza di chiusura sia nei quattro punti di appoggio delle colonne (uguale e contraria), sia l'applicazione di un forza che spinge verso il centro dello stampo. Quindi, a differenza di una comune chiusura a ginocchiera che ha quattro punti di applicazione della forza, nel modello brevettato JSW ne troviamo 8 (figura 28);
- Gruppo di iniezione. Costituito da due servomotori non diretti, ma con riduttore di velocità: si ha un'usura maggiore rispetto ad uno stesso motore diretto, ma il costo è inferiore e non ha bisogno di un impianto di refrigerazione aggiuntivo per raffreddare il motore;
- Sistema di controllo. Il terminale operatore SYSCOM 3000 garantisce un'altissima velocità di elaborazione dei dati e di riproducibilità dei parametri dello stampaggio, un incremento della produttività (aumenta l'efficienza produttiva) e la riduzione del tempo di ciclo grazie al controllo centesimale. Ha la possibilità di fare il backup dei dati nei pc aziendali, assicurando un'ottima tracciabilità delle fasi del processo ed inoltre ha

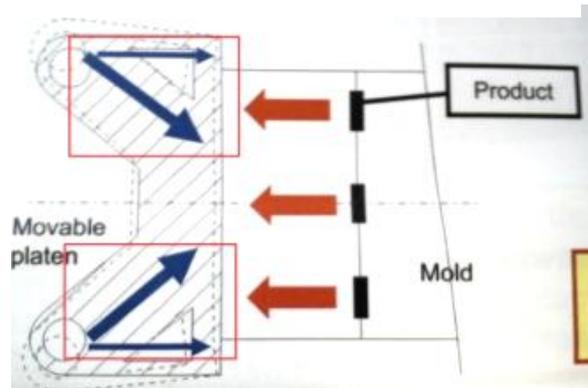


Figura 28 - chiusura brevettata JSW [15]

un sistema di controllo qualità automatico con la gestione dei parametri di stampaggio e la presenza di sistemi di allarme in caso di anomalie.

Vantaggi:

- Minori emissioni sonore;
- Riduzione del consumo di olio quasi totale;
- Non si effettua manutenzione preventiva;
- Migliore pulizia;
- Alti livelli di velocità, precisione, miglioramento nelle impostazioni delle quote per quanto riguarda gli azionamenti della macchina;
- Risparmio energetico compreso tra il 40% e il 60%;
- Riduzione del tempo di ciclo. Le presse con tecnologia giapponese hanno la possibilità di eseguire operazioni sovrapposte grazie alla combinazione pre-iniezione e pre-estrazione: il tempo di ciclo può ridursi anche del 25% rispetto ad uno stesso prodotto stampato in una macchina con operazioni non sovrapposte. Avere una riduzione del tempo di ciclo significa che si ha un incremento della produttività, con un ritorno economico in tempi minori. Allora si può parlare anche di proficuità: il pay-back avviene in tempi più rapidi grazie all'altissima efficienza produttiva in termini di maggiore costanza e quantità prodotta, oltre ad avere una maggiore qualità del prodotto finito, caratteristica comune a tutte le presse elettriche.

#### 2.4.4. La scelta di non acquistare una pressa elettrica

Giflor srl è un'azienda del vicentino (Grumolo delle Abbadesse) che è di riferimento a livello internazionale per i produttori di contenitori. Nasce nel 1985 come produttore di tappi per flaconi di varie misure, realizzati mediante il processo di stampaggio ad iniezione. L'azienda ha come punto di forza un'elevata flessibilità, personalizzazione del prodotto finito e rapidità di consegna degli ordini in base alle esigenze del cliente, garantite grazie ad una tecnologia efficiente con tecniche di stampaggio multicolore e attente all'ambiente.

Il prodotto realizzato da Giflor è una vasta gamma di tappi per flaconi di più misure e colori, per contenitori rigidi o morbidi, utilizzati per il settore della cosmesi e della detergenza. Per la produzione dei prodotti finiti si è deciso di investire inizialmente su presse di progettazione italiana: le BMB. L'azienda dispone di un stabilimento di produzione dedicato allo stampaggio ad iniezione con macchine ad azionamento idraulico.

La scelta di non investire su una tecnologia elettrica è dettata dal tipo di packaging che l'azienda produce: per la maggior parte delle misure di tappi i tempi di ciclo sono brevi, quindi il risparmio energetico che si avrebbe con una pressa elettrica non è così determinante.

Come soluzione per manufatti con tempi superiori ai 15 s, si è deciso di mantenere comunque un impianto idraulico, con l'aggiunta di un ulteriore componente: l'inverter. È un dispositivo ausiliario, un motore che interagisce con l'azionamento idraulico e sfrutta l'energia elettrica solo per la fase di carica; viene collocato all'esterno del motore idraulico e collegato direttamente alla centralina. L'inverter ha la capacità di manipolare le frequenze, consentendo alla macchina di lavorare alla stessa potenza, ma con una frequenza minore di 50 Hz (a seconda della fase si possono raggiungere anche i 30 Hz). Questo sistema elettrico per il controllo delle frequenze permette di abbattere i costi dell'energia elettrica, mantenendo comunque l'iniezione e la chiusura dello stampo azionati dal motore oleodinamico. L'aggiunta dell'inverter permette di abbattere i costi dell'energia elettrica pari a circa il 30% - 40% a fronte di un investimento relativamente ridotto del dispositivo.

Giflor ha valutato anche come aspetto negativo di un eventuale investimento in una pressa elettrica la formazione del personale: è richiesta più specializzazione per utilizzare un sistema di controllo CNC, con un ulteriore investimento sulla formazione del personale. a differenza di quanto richiesto con i motori oleodinamici, poiché i principi dell'oleodinamica sono una conoscenza di base per gli operatori che lavorano nel settore industriale, è una scienza che è studiata da molti anni anche negli istituti superiori quindi si può dire che c'è una vasta conoscenza della materia. Ciò non è sempre vero se si tratta di azionamenti elettrici: alcuni operatori potrebbero aver bisogno di formazione per capire bene che cosa avviene all'interno di un motore [16].

## CAPITOLO 3

# Analisi economica di una pressa ad azionamento idraulico e una ad azionamento elettrico

### 3.1 I fattori di costo

Per la scelta della pressa idonea in base al tipo di manufatto da produrre, è necessario condurre una preventivazione corretta dei costi e dei ricavi ad esso collegato, in modo da verificare se l'investimento è economicamente conveniente o se è meglio investire in una soluzione alternativa.

Di seguito si elencano le voci che determinano i costi da analizzare in un processo di stampaggio ad iniezione.

#### 3.1.1. Costo dello stampo

Nonostante spesso venga considerato un costo a parte, perché prodotto da un fabbricante diverso da quello che esegue lo stampaggio, è un componente fondamentale per l'analisi quando si esamina una scelta tra alternative di investimento poiché ha un costo di acquisto elevato: in base al numero di figure, alla complessità della geometria, al sistema di alimentazione e al sistema di raffreddamento si ha un aumento o una riduzione del costo: maggiore è la complessità dello stampo, maggiore saranno i costi di investimento ad esso associati.

La formula per ricavare il costo dello stampo è

$$C_{s\ impr} = C_{prog} + C_{fabb} + C_{coll} \quad [4]$$

Calcola il costo dello stampo riferito ad una singola figura stampata.  $C_{prog}$  si riferisce al costo del progetto,  $C_{fabb}$  al costo di fabbricazione dello stampo a singola impronta, mentre  $C_{coll}$  è il costo per il collaudo dello stampo finito.

Delle tre voci indicate, l'unico che può essere calcolato analiticamente è il costo di fabbricazione che comprende al suo interno il costo delle singole piastre e il costo di lavorazione; gli altri due costi vengono stimati: se il costo di fabbricazione  $C_{fabb}$  comprende il 70% del costo dello stampo, allora si stima il restante  $C_{prog} + C_{coll} = 30\%$  del costo totale dello stampo.

Il costo totale dello stampo sarà

$$C_{\text{stampo}} = C_{s \text{ impr}} \times i^m \quad [4]$$

con i numero di impronte e m un coefficiente stimato pari a  $m=0,7$

### 3.1.2. Costo dello stampaggio

Riguarda il costo per la trasformazione da materia prima a prodotto finito. Per calcolare il valore della trasformazione unitaria si utilizza la formula

$$C_{\text{stampaggio}} = \frac{(C_{\text{mod oraria}} + C_{\text{gen}}) \times t_c}{i \times \eta_{\text{tot}}} \quad [2]$$

Dove con  $\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{scarti}} \cdot \eta_{\text{op}} \cdot \eta_{\text{macc}}$  si intende il rendimento totale pari al prodotto dei rendimenti relativi agli scarti di materie prime, dell'efficienza dell'operatore e dell'efficienza della macchina. È importante considerare l'efficienza quando si calcolano i costi perché ci si deve cautelare da eventuali pezzi scarto prodotti dalla macchina o dall'uomo sovrastimando di poco la produzione.

### 3.1.3. Numero di impronte

Per determinare il numero ottimale di impronte in un determinato stampo bisogna trovare il

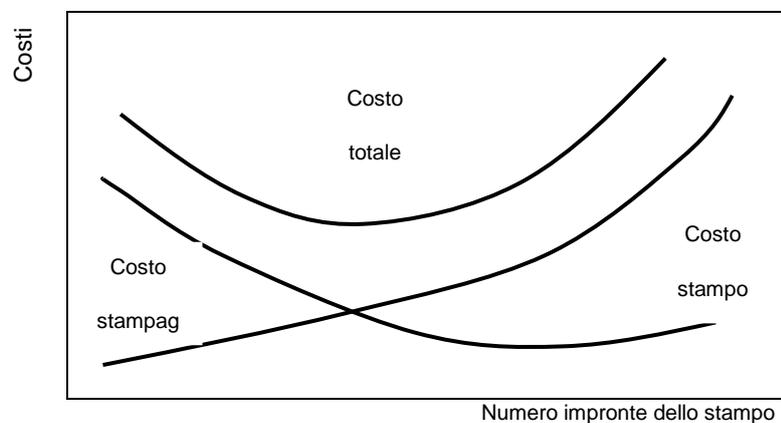


Figura 29 - relazione tra i costi e il numero di impronte [2]

minimo costo totale di fabbricazione degli N pezzi da produrre.

In base alla figura 29 è evidente come il costo di stampaggio diminuisca all'aumentare del numero di impronte, in quanto esso è un costo fisso indipendente dalla quantità prodotta: una maggiore produzione indica un

valore più ampio sul quale ripartire il costo legato alla trasformazione del prodotto, il costo di stampaggio infatti risulta essere identico sia in uno stampo di un'impronta, sia in uno stampo con n impronte. D'altro canto il costo di investimento dello stampo aumenta all'aumentare delle stesse, ma se la quantità da produrre sufficiente, porterà a dei costi unitari più bassi.

Se consideriamo il costo totale definito come  $C_{TOT} = C_S + C_T + C_M$ . I termini  $C_S$  già definito prima corrisponde al costo totale dello stampo per il numero di impronte,  $C_T$  il costo di

trasformazione cioè pari al costo per passare dalla materia prima al prodotto finito (anch'esso legato ad  $i$ ) ed infine  $C_M$  relativo alla materia prima. Si ha un punto di ottimo per il valore di  $i$  che soddisfa l'equazione

$$\frac{dC_{TOT}}{di} = 0$$

Cioè per  $i = \sqrt[m+1]{\frac{t_c \cdot N \cdot K_0}{m \cdot C_s \text{ impr}}}$  dove  $K_0$  è una costante sperimentale,  $N$  è il numero di pezzi da stampare,  $m=0,7$  definita prima. Il numero teorico di impronte così calcolato deve essere confrontato con il numero pratico di impronte stabilito dal tipo di pressa utilizzata.

#### 3.1.4. Costo di investimento

È il costo di acquisto della macchina che comprende tutti i componenti di cui è dotata e dei motori inclusi.

Al costo per l'investimento iniziale viene associato un relativo ammortamento per il macchinario, cioè la ripartizione di una quota di acquisto ripartita in quanti anni sono gli anni ipotizzati di vita utile del macchinario. È una quota da sottrarre ogni anno ai ricavi in modo che l'effetto del tempo e dell'utilizzo sul valore iniziale del bene venga registrato nei documenti contabili dell'impresa. Ci sono diversi criteri per determinare la quota di ammortamento tra i quali: ammortamento a quote costanti, a quote decrescenti, in base al grado di utilizzo. Per convenzione si sceglie di utilizzare un ammortamento fiscale con aliquota fissa stabilita dalla normativa. L'ammortamento ordinario prevede un deprezzamento lineare del bene con coefficiente stabilito per legge, il quale sarà considerato ridotto del 50% nel flusso di cassa dell'anno 1 e dell'anno  $n$ , cioè i due estremi dell'orizzonte temporale. Per macchinari per la produzione industriale di materie plastiche si ha un ammortamento fiscale del 12,5%.

#### 3.1.5. Altri costi

- Costo della manodopera. Si intende il costo per un singolo operatore all'ora;
- Costo della materia prima. Costo per l'acquisto di materie prime necessarie a sostenere la produzione;
- Costo dell'energia elettrica. Costo per l'utilizzo delle presse, anche quelle di origine idraulica dato che partono da un motore asincrono che trasforma l'energia elettrica in meccanica;

- Costo di manutenzione. Suddiviso in manutenzione preventiva (necessaria solo nelle presse idrauliche) e manutenzione ordinaria (circa il 20% dell'investimento iniziale).

### 3.2. Il caso studio: due presse italiane a confronto

Di seguito si elencano le principali differenze tecniche ed economiche in merito ad uno studio fatto sulle presse progettate da BMB ad azionamento idraulico ed elettrico, a parità di forza di chiusura e di stampo [2; 16; 17].

	<b>Idraulica KW 38 Pi</b>	<b>Elettrica eKW 38 Pi</b>
	Specifiche tecniche	
Forza di chiusura [kN]	3800	3800
Corsa di apertura dello stampo [mm]	700	700
Passaggio tra le colonne [mm]	710×630	730×730
Spessori dello stampo [mm]	250 – 750	250 – 750
Diametro vite [mm]	65	55
L/D	25	25
Volume di iniezione [cm <sup>3</sup> ]	1125	615
Capacità max di iniezione PP [g]	830	461
Velocità di rotaz. della vite [min <sup>-1</sup> ]	250	450
Ciclo a vuoto [s]	1,7	2,00
Coppia massima della vite [Nm]	1600 (sul motore oleodinamico)	800
Capacità serbatoio [lt]	800	-
Potenza di riscaldamento [kW]	32,5	24
Zone di riscaldamento cilindro	4+1	4+1
	Specifiche per il determinato prodotto	
Numero di figure per stampo ( <i>i</i> )	8	8
Quantità di PP necessaria [g/pz]	50	50
Tempo di ciclo ( <i>t<sub>c</sub></i> ) [s]	15	13,5
Efficienza della macchina ( $\eta_{macc}$ )	80%	90%
Efficienza dell'operatore ( $\eta_{op}$ )	90%	97%
Percentuale di scarti ( $\eta_{scarti} = 1-x$ )	1-0,05 = 95%	1-0,05 = 95%
Efficienza totale ( $\eta_{tot}$ )	68,4%	82,935%

Consumi energia spec. [kWh/kg]	0,93	0,41
Consumi energia elettrica [kWh]	70	31
	Investimento	
Costo del macchinario [€]	155000	214000
Costo dello stampo [€]	200000	200000
Aliquota per l'amm. Fiscale	12,5%	12,5%
Quota di ammortamento [€/a]	44375	51750

Per l'analisi degli scostamenti tra i due impianti e la valutazione economica si procede calcolando i costi unitari totali, i rispettivi costi annuali totali e i ricavi. Per determinare i ricavi ( $R = Q \cdot p$ ) bisognerà trovare la massima quantità che la macchina può produrre all'anno e il prezzo di vendita adeguato.

Il prezzo si può stimare dalla formula

$$p = (1 + S_p) \cdot (c_{fab}) + F \cdot (I) \quad [2]$$

$S_p$  è relativo alle spese generali amministrative e di vendita espresse come frazione del costo di fabbricazione, determinato in base al tipo di industria (di solito tra il 15% e il 20%)

$F$  è il ritorno sugli investimenti espresso come loro frazione

$I$  investimento totale costituito dal capitale circolante e dal capitale fisso. Si può stimare che l'investimento è pari a  $I = \frac{1}{3}(c_{fab}) + 1,5(c_{inv})$  in cui il primo prodotto riguarda il capitale circolante, mentre il secondo il capitale fisso riferito al costo ripartito per singolo prodotto.

Allora il prezzo di vendita sarà pari a

$$p = (1,20) \cdot (c_{fab}) + 0,20\left(\frac{1}{3}c_{fab} + 1,5c_{inv}\right)$$

Per quanto riguarda i rendimenti, è importante sottolineare la differenza tra le efficienze stimate per i differenti tipi di impianto:

- $\eta_{scarti}$  riferito agli scarti irrecuperabili è costante, in quanto è riferito al materiale utilizzato (polipropilene) che è utilizzato in entrambe le macchine. Si considera per entrambe le presse uno scarto del 5%, cioè il rendimento vale  $\eta_{scarti} = 95\%$ ;
- $\eta_{macc}$  riferito al macchinario utilizzato, come già spiegato nei capitoli precedenti l'efficienza di una macchina idraulica è minore di una elettrica;

- $\eta_{op}$  anche per quanto riguarda l'operatore si ha un'efficienza nella macchina elettrica caratteristica, dovuto alla rumorosità dell'impianto e al controllo di meno variabili.

### 3.2.1. Calcolo dei costi unitari

Si considerano i seguenti costi

	<b>Idraulica KW 38 Pi</b>	<b>Elettrica eKW 38 Pi</b>
Costo materia prima (PP)	1305 €/ton	1305 €/ton
Costo energia	0,18 €/kWh	0,18 €/kWh
Costo manodopera	23,70 €/h	24,50 €/h
Costo olio	3,40 €/lt	-

La giornata lavorativa di 24 h è suddivisa in 3 turni, inoltre ogni operatore segue 8 macchine durante il processo di stampaggio. I giorni lavorativi totali all'anno sono 260.

Per determinare i costi totali unitari bisogna considerare i vari fattori di costo, ovvero:

- Costo della materia prima;
- Costo di stampaggio;
- Costo di investimento;
- Costo per la manutenzione;
- Costo dell'energia elettrica.

Il costo totale unitario si ricava facendo la somma delle voci di costo sopra elencate.

$$c_{tot} = c_{mp} + c_s + c_{man} + c_{en}$$

#### *Calcolo del costo della materia prima*

Considerando che utilizzo polipropilene (PP) venduto a 1305 €/ton, cioè a 1,305 €/kg e per produrre un pezzo di 8 figure servono 50 g di materiale

$$c_{mp} = \frac{q_{mp} \cdot p_{mp}}{i \cdot \eta_{scarti}} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 1,305}{8 \cdot 0,95} = 0,0086 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

Il costo unitario di materia prima risulta essere identico per entrambi gli impianti, in quanto il consumo di materia prima per pezzo è lo stesso.

### Calcolo del costo di stampaggio

L'analisi dei costi si deve suddividere in base ai due casi di impianti diversi, poiché la pressa elettrica è più performante sia dal punto di vista della meccanica che dell'operatore ha un'efficienza più elevata. Inoltre ci si aspetta che, grazie alla riduzione nel tempo di ciclo, si abbia una produzione maggiore a parità di ore lavorative.

Il valore del costo di stampaggio si calcola in base a

$$c_s = \frac{(\frac{c_{mod}}{n} + c_{gen}) \cdot t_c}{i \cdot \eta_{tot}}$$

Nella tabella dei costi si è evidenziato come il costo della manodopera sia maggiore per una pressa elettrica rispetto ad una idraulica: questo perché si considera di assumere personale già formato e più specializzato dato che i sistemi di controllo necessitano di una preparazione maggiore. Eventualmente, al posto di considerare la manodopera a costi maggiore, si può inserire nei costi legati all'avviamento una quota relativa alla formazione del personale.

I costi generali per la fabbricazione indicati nella formula si possono considerare pari al 200% della manodopera diretta.

Allora per la macchina idraulica si ha un costo unitario di trasformazione pari a

$$c_{s,idr} = \frac{(\frac{23,7}{8} + (\frac{23,7}{8})200\%) \cdot 15}{3600 \cdot 8 \cdot 0,684} = 0,0068 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

Mentre per la elettrica

$$c_{s,el} = \frac{(\frac{24,50}{8} + (\frac{24,5}{8})200\%) \cdot 13,5}{3600 \cdot 8 \cdot 0,82935} = 0,0052 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

Si nota come i costi unitari iniziano a scendere nella pressa elettrica.

### Calcolo del costo di investimento diretto

È necessario calcolare il costo di investimento relativo alla produzione in esame per poi ripartire il risultato in €/pz. Il valore ottenuto sarà di riferimento per il calcolo dei costi relativi alla manutenzione generale, elemento da non trascurare quando si effettua l'analisi dei costi.

Consideriamo l'investimento diretto di entrambe le macchine:

	<b>Idraulica KW 38 Pi</b>	<b>Elettrica eKW 38 Pi</b>
Pressa	155000 €	214000 €
Stampo	200000 €	200000 €
<b>Totale (I)</b>	<b>355000 €</b>	<b>414000 €</b>

Si calcolano le ore necessarie per la produzione specifica di quel manufatto necessarie all'anno. Prima di tutto bisogna calcolare la produzione massima consentita dalla macchina durante l'anno (260 giorni):

$$\text{prod}_{\text{max,a}} = \left( \frac{24 \cdot 260 \cdot 3600}{t_c} \cdot \eta_{\text{tot}} \right) \cdot i$$

Successivamente si calcola il tempo necessario per la produzione specifica di quel manufatto, considerando un periodo di studio di un anno si ha:

$$t_{\text{prod}} = \frac{\text{prod}_{\text{max,a}} \cdot t_c}{i}$$

Ed infine il calcolo dell'investimento ripartito per la produzione di un singolo pezzo:

$$c_{\text{inv}} = \frac{t_{\text{prod}} \cdot I}{h_{\text{max}} \cdot \text{prod}_{\text{max,a}}}$$

Considerando  $h_{\text{max}}$  come il massimo di ore disponibili del macchinario per la produzione del manufatto. Se si considera che la macchina funziona 24h/24 allora le ore di funzionamento all'anno risultano essere  $h_{\text{max}} = 24 \cdot 260 = 6240$  h/anno, valore uguale per entrambe le presse.

- Pressa idraulica

$$\text{prod}_{\text{max,a}} = \left( \frac{24 \cdot 260 \cdot 3600}{15} \cdot 0,684 \right) \cdot 8 \cong 8100000 \frac{\text{pz}}{\text{anno}}$$

$$t_{\text{prod}} = \frac{8100000 \cdot 15}{3600 \cdot 8} = 4219 \frac{\text{h}}{\text{anno}}$$

$$c_{inv} = \frac{4219 \cdot 355000}{6240 \cdot 8100000} = 0,0296 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

- Pressa elettrica

$$\text{prod}_{\text{max,a}} = \left( \frac{24 \cdot 260 \cdot 3600}{13,5} \cdot 0,82935 \right) \cdot 8 \cong 11000000 \frac{\text{pz}}{\text{anno}}$$

$$t_{\text{prod}} = \frac{11000000 \cdot 13,5}{3600 \cdot 8} = 5156 \frac{\text{h}}{\text{anno}}$$

$$c_{inv} = \frac{5156 \cdot 414000}{6240 \cdot 11000000} = 0,0311 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

### Calcolo del costo per la manutenzione

Si assumono i costi generali per la manutenzione delle macchine pari al 20% del costo di investimento unitario. Inoltre, per quanto riguarda le presse idrauliche, è fondamentale anche considerare anche la manutenzione ordinaria. Come già spiegato nei capitoli precedenti, sostituire l'olio motore e gli accumulatori è di fondamentale importanza per la viscosità del primo e la generazione delle pressioni adeguate. Pertanto, dato che l'olio deve essere sostituito ogni 8000 h di funzionamento, cioè a 1 anno e 3 mesi circa si possono calcolare i costi della manutenzione ordinaria:

	<b>Idraulica KW 38 Pi</b>	<b>Elettrica eKW 38 Pi</b>
Consumo di olio	800 lt · 3,4 €/lt = 2720 €/ogni 8000 h	-
Ore anno di funz. = 6240 h	2720/1,25 = 2176 €/a	-
Costo accumulatori	150 €	-
Quantità accumulatori	2	-
Totale costo accumulatori	300 €	-
Totale man. Preventiva	2476 €/a	0 €/a
Totale man. prev. unitaria	2476/1012500 = 0,0024 €/pz	0 €/pz
Man. generale (0,2 · c <sub>inv</sub> )	0,2 · (0,0296) = 0,0059 €/pz	0,2 · (0,0311) = 0,0062 €/pz
Totale man unitaria	0,0084 €/pz	0,0062 €/pz

### Calcolo del costo per il consumo di energia elettrica

Conoscendo il consumo specifico di energia elettrica per kg è facile calcolare il consumo per singolo pezzo prodotto:

$$c_{en} = \left( \frac{CONS_{en\ spec} \cdot q_{mp}}{\eta_{macc} \cdot \eta_{scarti}} \right) \cdot p_{en}$$

Si nota che si considerano solo i rendimenti per gli scarti irrecuperabili e della pressa, in quanto si sta calcolando il costo dell'energia non al netto della produzione totale, dunque ci si deve cautelare sia dal punto di vista degli scarti di materiale, sia dal punto di vista dell'errore della macchina.

$$c_{en,idr} = \left( \frac{0,93 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{0,80 \cdot 0,95 \cdot 8} \right) \cdot 0,18 = 0,0014 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

$$c_{en,el} = \left( \frac{0,41 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{0,90 \cdot 0,95 \cdot 8} \right) \cdot 0,18 = 0,0006 \frac{\text{€}}{\text{pz}}$$

Riassunto dei dati in una tabella in modo da trovare il costo totale unitario ( $c_{tot} = c_{mp} + c_s + c_{man} + c_{en}$ )

	<b>Idraulica KW 38 Pi</b>	<b>Elettrica eKW 38 Pi</b>
$c_{mp}$ €/pz	0,0086	0,0086
$c_s$ €/pz	0,0068	0,0052
$c_{man}$ €/pz	0,0084	0,0062
$c_{en}$ €/pz	0,0014	0,0006
<b><math>c_{tot}</math></b>	<b>0,0252 €/pz</b>	<b>0,0206€/pz</b>
$c_{inv}$ €/pz	0,0296	0,0311
$t_{prod}$ h/a	4219	5156
$prod_{max,a}$ pz/a (Q)	8100000	11000000

### 3.2.2. Calcolo del prezzo di vendita

Per calcolare un prezzo di vendita ideale ci si avvale della formula scritta in precedenza, che considera un ritorno sugli investimenti calcolato sia sul capitale fisso che sul capitale circolante.

$$p = (1,20) \cdot (c_{fabbb}) + 0,20 \left( \frac{1}{3} c_{fabbb} + 1,5 c_{inv} \right)$$

Allora, per la pressa idraulica si avrà un prezzo pari a

$$p_{idr} = (1,20) \cdot (0,0252) + 0,20 \left( \frac{1}{3} \cdot 0,0252 + 1,5 \cdot 0,0296 \right) = 0,041 \frac{\text{€}}{\text{pz}} \cong \mathbf{0,040 \frac{\text{€}}{\text{pz}}}$$

Mentre per l'elettrica sarà

$$p_{el} = (1,20) \cdot (0,0206) + 0,20 \left( \frac{1}{3} \cdot 0,0206 + 1,5 \cdot 0,0311 \right) = \mathbf{0,035 \frac{\text{€}}{\text{pz}}}$$

Si può notare come la riduzione dei costi di produzione e l'aumento della produttività consentirebbe al produttore di manufatti con una macchina elettrica di porre un prezzo di vendita inferiore ad una stessa produzione effettuata su un azionamento idraulico. Per convenzione nell'analisi che segue si tiene come prezzo di vendita quello della macchina idraulica, in modo da essere sicuri di non andare in perdita durante l'analisi.

Confrontando i dati ottenuti con i dati reali di mercato si vede che il costo totale di ogni pezzo risulta pari a 0,020 €/pz, mentre per il prezzo di vendita si è scelto di mantenerlo a 0,030 €/pz costante nel tempo: infatti, la domanda di mercato per questo tipo di prodotti finiti funzionali ha un andamento costante con variazioni annuali inferiori all'1% [16].

Avendo il prezzo di vendita  $p = 0,04 \text{ €}$  al pezzo e la quantità massima da produrre ora si può procedere con l'analisi dei costi e la valutazione degli investimenti.

### 3.3. Analisi dei costi

Per l'analisi dei costi si suppone che tutta la quantità prodotta annualmente venga venduta; si procede calcolando in primo luogo i costi totali annuali che l'azienda deve affrontare per far fronte alla quantità richiesta di prodotti finiti.

	Idraulica KW 38 Pi	Elettrica eKW 38 Pi	$\Delta x = x_{el} - x_{idr}$
Produzione annuale [pz/a]	8100000	11000000	+2900000
Costo orario [€/pz]	0,0252	0,0206	-0,0046
<b>Costi totali</b>	<b>204120</b>	<b>226600</b>	<b>+22480</b>

I costi espressi in tabella sono tutti da considerarsi per €/anno. Si può notare che si ha un incremento dei costi legati alla trasformazione se si utilizza una macchina elettrica a parità di prodotto realizzato (incremento di +22480 € all'anno) dovuti soprattutto all'incremento della produttività e ad un maggiore investimento iniziale.

Il fatto che sia aumentato il costo totale annuo non è necessariamente un aspetto negativo: bisogna verificare se un aumento della quantità prodotta (e quindi venduta) porta a dei ricavi maggiori, in modo da giustificare dei costi più elevati.

Si esamina la tabella dei ricavi a parità di prezzo di vendita ( $p = 0,040$  €/pz) per la massima quantità prodotta da entrambe le presse.

	Idraulica KW 38 Pi	Elettrica eKW 38 Pi	$\Delta x = x_{el} - x_{idr}$
Prezzo calcolato [€/pz]	0,040	0,035	-0,005
Prezzo di vendita [€/pz]	<b>0,040</b>	<b>0,040</b>	-
Numero di figure i	8	8	-
Prezzo per figura $p_{fig} = p \cdot i$	0,32	0,28	-0,04
Quantità venduta [pz/a]	8100000	11000000	+2900000
<b><math>R_{tot(p=0,20)} = p \cdot Q</math></b>	<b>324000</b>	<b>440000</b>	<b>+116000</b>
<b><math>\pi_{tot} = R_{tot} - C_{tot}</math></b>	<b>119880</b>	<b>213400</b>	<b>+93520</b>

La tabella dei ricavi e del profitto netto dimostra come si ha un aumento sia dei ricavi totali (+116000 € all'anno), sia un incremento del profitto netto di quasi 100000 € annuali. Quindi, con un'analisi di soli scostamenti si vede che i costi più elevati sono giustificati da ricavi più elevati.

Scegliendo invece di fare l'analisi dei costi tenendo il prezzo di vendita stabilito per una pressa elettrica risulta:

	Idraulica KW 38 Pi	Elettrica eKW 38 Pi	$\Delta x = x_{el} - x_{idr}$
Prezzo calcolato [€/pz]	0,040	0,035	-0,005
Prezzo di vendita [€/pz]	<b>0,035</b>	<b>0,035</b>	-
Numero di figure i	8	8	-
Prezzo per figura $p_{fig} = p \cdot i$	0,32	0,28	-0,04
Quantità venduta [pz/a]	8100000	11000000	+2900000
<b><math>R_{tot} (p=0,20) = p \cdot Q</math></b>	<b>283500</b>	<b>385000</b>	<b>+101500</b>
<b><math>\pi_{tot} = R_{tot} - C_{tot}</math></b>	<b>79380</b>	<b>158400</b>	<b>+79020</b>

Anche in tal caso si verifica un ricavo positivo per entrambe le soluzioni ed uno scostamento positivo. Dal risultato si evince che è possibile ridurre anche il prezzo di vendita nel caso si produca il manufatto con una macchina elettrica.

È necessario verificare l'effettiva convenienza analizzando i ricavi al netto dell'ammortamento e delle imposte.

### 3.4. Analisi degli investimenti

L'analisi che si svolgerà in seguito serve per determinare se e quando un investimento iniziale consistente e i relativi costi per il funzionamento vengono recuperati grazie ai ricavi da esso generati, cioè si esamina il rendimento economico che un dato progetto deve generare per renderlo un investimento economicamente conveniente; inoltre deve anche fornire un rendimento sufficientemente attraente per far fronte a rischi ad esso connessi e dei potenziali impieghi alternativi del capitale investito.

Come tecnica per la valutazione economica con scelta tra diverse alternative si sceglie di utilizzare il seguenti metodi:

- *PW (Present Worth)*: metodo del valore attuale netto (VAN), ovvero il valore attuale equivalente di tutti i flussi di cassa rispetto a un istante di riferimento iniziale. È necessario attualizzare i flussi di cassa netti (introiti – esborsi), in quanto si ha una relazione tra il denaro e il tempo: a causa dei tassi di interesse, il valore del denaro che si ha in questo momento non sarà uguale a quello che si avrà tra n anni, si verificherà una riduzione del suo valore.

Il metodo PW in un'alternativa di investimento misura quanto denaro la singola impresa può ottenere da un investimento, una volta che sono stati ripagati i costi. Si

ha una soluzione economicamente accettabile quando  $PW > 0$ , in caso contrario è un'alternativa di investimento sulla quale non è conveniente investire.

Nel caso specifico si deve scegliere se investire in un impianto elettrico piuttosto che in uno idraulico, la scelta di investimento migliore risulterà quella che avrà un PW più elevato [18].

- *Payback period* attualizzato. Non è una tecnica per la scelta tra alternative diverse, ma un indice che si può integrare nella valutazione economica in quanto fornisce la velocità con cui un investimento viene recuperato attraverso le entrate di denaro che esso produce.

Nello studio tra due alternative diverse ovviamente sarà prediletta la scelta di investimento in cui si ha il pay-back minimo [18].

Il tasso di interesse di riferimento necessario per attualizzare i flussi di cassa presenti nell'orizzonte temporale del periodo di studio della valutazione economica viene denominato MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*), ovvero il tasso minimo di rendimento conveniente. Il MARR aziendale deve essere scelto in modo tale da massimizzare la redditività dell'impresa lungo il periodo di studio, ed in particolare non è possibile fissare un MARR inferiore al 10%. Da notare che maggiore è il tasso di rendimento, minore è il PW [16]. A titolo di esempio per la valutazione economica svolta in seguito, si fissa un MARR pari al 16% ed una aliquota fiscale pari al 45%.

Per la valutazione economica si considera un periodo di studio di 10 anni ed un ammortamento a quote costanti fissato in base ad un'aliquota di ammortamento fiscale ( $q_{amm} = 12,5\%$ ).

Per il calcolo dei flussi di cassa si è fissato il prezzo di vendita pari a  $p = 0,04 \text{ €/pz}$ .

#### 3.4.1. Calcolo dei flussi di cassa prima e dopo le imposte e il VAN riferito al MARR

	<b>BTCF</b>	<b>Aliquota amm</b>	<b>Amm</b>	<b>Imponibile</b>	<b>Imposte</b>	<b>ATCF</b>
0	Inv		-	-	-	Inv
n= 1..N	FC = I-E	12,5%	(Inv)q	FC-Amm	(Imponibile)0,45	FC-imposte

Nella scelta di una pressa idraulica si ricavano i seguenti flussi di cassa e il VAN

In un primo caso si esegue la valutazione economica supponendo che:

- L'azienda vende tutto quello che produce. Ovvero, se dispone di un impianto idraulico produrrà 8100000 pz/anno; nel caso di una pressa elettrica produrrà 11000000 pz/anno
- Il prezzo di vendita sia pari a  $p = 0,04 \text{ €/pz}$

Anno	BTCF	Aliquota amm.	Amm.	Imponibile	Imposte	ATCF
0	-€ 355.000					-€ 355.000
1	€ 119.880	6,25%	22187,5	€ 97.693	-€ 43.962	€ 75.918
2	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
3	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
4	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
5	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
6	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
7	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
8	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
9	€ 119.880	12,50%	44375	€ 75.505	-€ 33.977	€ 85.903
10	€ 119.880	6,25%	22187,5	€ 97.693	-€ 43.962	€ 75.918
						<b>VAN = € 49.317</b>

Mentre per la rispettiva elettrica risulta

Anno	BTCF	Aliquota amm.	Amm.	Imponibile	Imposte	ATCF
0	-€ 414.000					-€ 414.000
1	€ 213.400	6,25%	25875	€ 187.525	-€ 84.386	€ 129.014
2	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
3	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
4	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
5	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
6	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
7	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
8	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
9	€ 213.400	12,50%	51750	€ 161.650	-€ 72.743	€ 140.658
10	€ 213.400	6,25%	25875	€ 187.525	-€ 84.386	€ 129.014
						<b>VAN = € 253.153</b>

### 3.4.2. Valutazione degli investimenti in base al VAN, al pay-back period e considerazioni

Si nota che entrambe le presse, per il periodo di studio preso in esame, generano dei flussi di cassa che rendono il VAN positivo alla fine del periodo 10. Tuttavia, il VAN della pressa elettrica è maggiore di quello della pressa idraulica a parità di domanda di mercato e di prezzo, quindi la scelta dovrebbe ricadere sulla pressa elettrica.

Per determinare la velocità con cui l'azienda recupera l'investimento iniziale bisogna fare la somma di tutti i flussi di cassa attualizzati. Si trova il tempo di pay-back quando gli introiti eguagliano le uscite di cassa. Si ricava dalla formula

$$\sum_{k=1}^{\theta} (R_k - E_k)(P/F, i\%, k) - I \geq 0 \quad [18]$$

$R_k - E_k$  corrisponde al flusso di cassa dell'anno calcolato (R sono i ricavi dell'anno k, mentre E sono gli esborsi dello stesso anno);

$(P/F, i\%, k)$  esprime il coefficiente per attualizzare il flusso di cassa dell'anno k, considerando  $i\%$  pari al MARR;

I corrisponde all'investimento iniziale.

- Pressa idraulica

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>FC</b>	-355000	65446,6	63839,9	55034,4	47443,5	40899,5	35258,2	30395,0	26202,6	22588,4	17209,4
<b>Somma FC</b>	-355000	-289553,4	-225713,5	-170679,1	-123235,6	-82336,1	-47077,9	-16682,9	9519,7	32108,1	49317,5
											↑ VAN

Quindi il pay-back period è posizionato tra il sesto e il settimo anno. Tramite l'interpolazione lineare è possibile trovare il periodo esatto:

$$\frac{8 \text{ anno} - x}{8 \text{ anno} - 7 \text{ anno}} = \frac{9519,7 - x}{9519,7 - (-16682,9)} = 7,6370$$

Avviene dopo 7 anni e 8 mesi circa.

- Pressa elettrica

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>FC</b>	-414000	111219,0	104531,8	90113,6	77684,0	66969,1	57732,0	49769,0	42904,3	36986,4	29245,4
<b>Somma FC</b>	-414000	-302781,0	-198249,2	-108135,6	-30451,6	36517,5	94249,5	144018,5	186922,8	223909,2	253154,6
											↑ VAN

Quindi il pay-back period è posizionato tra il quarto e il quinto anno. Tramite l'interpolazione lineare è possibile trovare il periodo esatto:

$$\frac{5 \text{ anno} - x}{5 \text{ anno} - 4 \text{ anno}} = \frac{36517,5 - x}{36517,5 - (-30451,6)} = 4,4548$$

Avviene dopo 4 anni e 5 mesi circa.

Grazie all'analisi del pay-back period si può dedurre che il tempo per recuperare l'investimento iniziale è minore per una pressa elettrica. In fase di valutazione economica per la scelta dell'investimento più adeguato si tiene conto anche di questo dato poiché può influire sulla scelta aziendale.

### 3.4.3. Determinare la macchina idonea in base alla domanda di mercato

Supponendo di non riuscire a vendere tutto quello che l'azienda produce, si determina quale pressa è economicamente conveniente al variare di  $q$ . Si fissa il prezzo di vendita pari a  $p=0,04 \text{ €/pz}$ .

I flussi di cassa per la pressa idraulica, tenendo conto che non si conosce la domanda di mercato, sono:

Anno	BTCF	Aliquota amm.	Amm.	Imponibile	Imposte	ATCF
0	-€ 355.000					-€ 355.000
1	0,1184·q	6,25%	22187,5	0,1184·q-22187,5	9984 - 0,0533·q	0,0651·q + 9984
2	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44375	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
3	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44375	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
4	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44375	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
5	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44375	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
6	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44375	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
7	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44385	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
8	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44385	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
9	0,1184·q	12,50%	44375	0,1184·q-44385	19969 - 0,0533·q	0,0651·q + 19969
10	0,1184·q	6,25%	22187,5	0,1184·q-22187,5	9984 - 0,0533·q	0,0651·q + 9984

Allora il valore attuale netto della pressa idraulica, tenendo conto dell'incognita  $q$ , risulta:

$$VAN_{q,idr}(16\%) = 0,3147 \cdot q - 269357$$

Anno	BTCF	Aliquota amm.	Amm.	Imponibile	Imposte	ATCF
0	-€ 414.000					-€ 414.000
1	0,1552·q	6,25%	25875	0,1552·q - 25875	11644 - 0,0698·q	0,0854·q + 11644
2	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
3	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
4	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
5	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
6	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
7	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
8	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
9	0,1552·q	12,50%	51750	0,1552·q - 51750	23288 - 0,0698·q	0,0854·q + 23288
10	0,1552·q	6,25%	25875	0,1552·q - 25875	11644 - 0,0698·q	0,0854·q + 11644

Mentre il valore attuale netto della pressa elettrica, tenendo conto dell'incognita  $q$ , risulta:

$$VAN_{q,el}(16\%) = 0,4129 \cdot q - 314120$$

Per trovare la quantità limite che influenza la scelta del tipo di macchina basta porre l'equazione  $VAN_{q,idr}(16\%) = VAN_{q,el}(16\%)$  per trovare l'incognita  $q$ .

Risulta che  $q=455835$  stampi, cioè  $q=3646680$  pz: se l'azienda ha una domanda di mercato inferiore a circa 3500000 pz conviene investire su una macchina idraulica, al di sopra di tale quantità conviene investire su una pressa elettrica.

### 3.4.5. Determinare la macchina idonea in base al prezzo di vendita

Anno	BTCF	Aliquota amm.	Amm.	Imponibile	Imposte	ATCF
0	-€ 355.000					-€ 355.000
1	8100000·p - 193885	6,25%	22187,5	8100000·p - 216072,5	97233 - 3645000·p	4455000·p - 96652
2	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
3	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
4	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
5	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
6	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
7	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
8	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
9	8100000·p - 193885	12,50%	44375	8100000·p - 238260	107217 - 3645000·p	4455000·p - 86668
10	8100000·p - 193885	6,25%	22187,5	8100000·p - 216072,5	97233 - 3645000·p	4455000·p - 96652

Allora il valore attuale netto della pressa idraulica, tenendo conto dell'incognita  $p$ , risulta:

$$VAN_{p,idr}(16\%) = 21532082 \cdot p - 429757 - 355000 = 21532082 \cdot p - 784757$$

Anno	BTCF	Aliquota amm.	Amm.	Imponibile	Imposte	ATCF
0	-€ 414.000					-€ 414.000
1	11000000·p - 209760	6,25%	25875	11000000·p - 235635	106036 - 4950000·p	6050000·p - 103724
2	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
3	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
4	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
5	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
6	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
7	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
8	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
9	11000000·p - 209760	12,50%	51750	11000000·p - 261510	117680 - 4950000·p	6050000·p - 92080
10	11000000·p - 209760	6,25%	25875	11000000·p - 235635	106036 - 4950000·p	6050000·p - 103724

Mentre il valore attuale netto della pressa elettrica, tenendo conto dell'incognita  $p$ , risulta:

$$VAN_{p,el}(16\%) = 29241028 \cdot p - 403722 - 414000 = 29241028 \cdot p - 817722$$

Per trovare il prezzo limite che influenza la scelta del tipo di macchina basta porre l'equazione  $VAN_{p,idr}(16\%) = VAN_{p,el}(16\%)$  per trovare l'incognita  $p$ .

Risulta che  $p=0,011$  €/pz: se l'azienda può stabilire un prezzo di vendita inferiore a 0,01 €/pz allora è possibile investire su una macchina idraulica, al di sopra di tale prezzo di vendita conviene investire su una pressa elettrica.

## CAPITOLO 4

### Elaborazione dei dati e delle differenze tecniche riscontrate

Si riporta un riassunto dei costi e dei dati ricavati in fase di analisi dei costi e degli investimenti per la produzione di tappi per i flaconi.

	<b>Idraulica KW 38 Pi</b>	<b>Elettrica eKW 38 Pi</b>
Investimento	355000 €	414000 €
Costi unitari	0,0252 €/pz	0,0206 €/pz
Produzione massima	8100000 pz/anno	11000000 pz/anno
Costi totali	204120 €/anno	226600 €/anno
Prezzo di vendita	0,040 €/pz	0,035 €/pz
RICAVI <sub>p=0,04</sub>	324000 €/anno	440000 €/anno
Profitto	119880 €/anno	213,400 €/anno
VAN(16%) <sub>q max,p=0,04</sub>	49317 €	253153 €
Pay-back period	7 anni e 8 mesi	4 anni e 5 mesi
Domanda di mercato incognita	Se $q < 3646680$ pz conviene la pressa idraulica	Se $q > 346680$ pz conviene la pressa elettrica
Prezzo di vendita incognito	Se $p < 0,01$ €/pz conviene la pressa idraulica	Se $p > 0,01$ €/pz conviene la pressa elettrica

Tutt'oggi, per la produzione di manufatti polimerici, sono ancora maggiormente utilizzate in Europa le presse idrauliche progettate durante gli anni '50. Data la grande richiesta del mercato di prodotti polimerici, si è dimostrato che non è sempre conveniente utilizzare un motore idraulico per la produzione: l'analisi dei costi e degli investimenti effettuata su una pressa idraulica della serie BMB KW 38 Pi ed una stessa pressa elettrica (BMB eKW 38 Pi) dimostra che, nel caso studiato, sarebbe più conveniente investire in una pressa elettrica in quanto il VAN risulta più elevato e il tempo di recupero dell'investimento iniziale (pay-back period) è minore. Inoltre si è analizzato entro quali limiti è più conveniente investire su una pressa elettrica rispetto ad una idraulica: è stato condotto uno studio dell'analisi degli investimenti tenendo incognite il prezzo di vendita in un caso e la domanda di mercato nell'altro. Dallo studio è risultato che trovato un prezzo od una quantità limite al di sotto di tale valore non è conveniente affrontare un investimento notevole iniziale per acquistare una

macchina elettrica in quanto, data la ridotta quantità da produrre (nel caso della domanda incognita) non eleva in maniera eccessiva i costi di esercizio; nel caso del prezzo di vendita basso, non conviene investire in una macchina elettrica in quanto il profitto non è sufficiente a ripagare i costi iniziali.

Lo studio dimostra come la pressa elettrica è in grado di ridurre i costi di esercizio: se un'azienda che opera con una pressa idraulica ha una domanda di mercato elevata, i costi di produzione associati saranno elevati a causa dell'elevato consumo di energia elettrica, di manutenzione e bassa efficienza della macchina con cui si sta lavorando. Infatti, l'efficienza di una pressa idraulica è minore a causa delle perdite di carico associate al motore idraulico e della minore precisione dei componenti (che possono causare più pezzi scarto o interruzioni del ciclo) causata da un controllo delle variabili termodinamiche più limitato.

I nuovi sistemi di controllo CNC installati sulle presse elettriche hanno permesso di raggiungere massimi livelli di efficienza grazie alla precisione centesimale dei componenti e alle ridotte perdite di potenza, con un conseguente aumento della produttività che può massimizzare il profitto dell'azienda. Inoltre vengono ridotti i costi di esercizio (manutenzione, consumo di energia elettrica, consumo di acqua) grazie ai motori elettrici che, non lavorando sempre al massimo della potenza, riducono la potenza media erogata senza utilizzare olio motore.

Tuttavia ci sono dei casi in cui la scelta verso una specifica tipologia di pressa è obbligata: come nel caso di prodotti farmaceutici è richiesta la massima sterilità, per cui la scelta è rivolta verso una pressa elettrica che non ha perdite di olio all'interno dello stampo; mentre nel caso di manufatti di grandi dimensioni è richiesta una potenza del motore elevata, un limite che la pressa elettrica non ha ancora superato.

# CONCLUSIONI

Il primo capitolo del progetto di tesi è stato elaborato grazie alla documentazione del processo di stampaggio ad iniezione dai manuali. Viene spiegato nel dettaglio quali sono i componenti che costituiscono una generica pressa e i suoi elementi di criticità.

Nel secondo capitolo viene elaborata un'analisi tecnica grazie ad una documentazione basata su una serie di interviste ad aziende che trattano quotidianamente con le due tipologie di presse principali: idrauliche ed elettriche.

Infine dall'analisi economica è emerso che, per il caso studiato, risulta più conveniente investire in una pressa elettrica grazie alla riduzione dei costi di esercizio ed un pay-back period minore, nonostante gli elevati costi di investimento. Si è dimostrato inoltre che non è sempre conveniente investire in una pressa elettrica: ci sono dei casi in cui se la domanda di mercato è minore o i prezzi di vendita sono bassi, i bassi profitti ricavati non riescono a ripagare l'investimento effettuato, per cui è più conveniente una soluzione idraulica.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] Styrresolution ([www.styrresolution.com](http://www.styrresolution.com)). Novembre 2013. Una nuova era per i polimeri. *Tecnolpast online* ([www.tecnoedizioni.com/tecnopalst-online](http://www.tecnoedizioni.com/tecnopalst-online)), p. 13.
- [2] Bertacchi G., 2011. *Manuale dello stampaggio progettato*. Tecniche Nuove.
- [3] Di Giovine G., 2012. *Progettazione di stampi in conglomerato cementizio per il processo di stampaggio ad iniezione di materiali plastici*. Università Politecnica delle Marche, Doctoral Thesis (<http://openarchive.univpm.it/>), Ottobre 2013.
- [4] Filippi A. M., *Fabbricazione di componenti in materiali polimerici*. Hopeli.
- [5] Mandruzzato C. e M., BMB Service ([www.bmb-servicepd.it](http://www.bmb-servicepd.it)), Padova (PD), Novembre 2013. *Presse elettriche serie eKW BMB*. Intervista diretta.
- [6] Parker ([www.parker.com](http://www.parker.com)), Giugno 2014
- [7] Formazione oleodinamica (<http://www.formazioneoleodinamica.it/>), Giugno 2014
- [8] Petocchi G., EPF Solution (<http://www.epfsolution.com>), Milano (MI), Ottobre 2013. *Vantaggi delle presse elettriche*. Intervista diretta.
- [9] Pedrotti E., Marzo 2013. L'evoluzione nella tecnologia di controllo del processo. *Tecnoplast online* ([www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online](http://www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online)) , p. 40.
- [10] Cantadore C., Ottobre 2013. Sensori di pressione in cavità per il controllo dello stampaggio a iniezione. *Tecnoplast online* ([www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online](http://www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online)), p. 15-17.
- [11] Paul Gorbach R. A., Gennaio/Febbraio 2013. Equilibrio termico dello stampo per iniezione. *Tecnoplast online* ([www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online](http://www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online)) , p. 36-38.
- [12] FANUC ([http://www.procomes.com/PDF/catalogo\\_presse\\_FANUC.pdf](http://www.procomes.com/PDF/catalogo_presse_FANUC.pdf)), Dicembre 2013, p. 7
- [13] Cantadore C., Agosto/Settembre 2013. Verve sceglie la full electric firmata Sumitomo (SHI) Demag. *Tecnoplast online* ([www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online](http://www.tecnoedizioni.com/tecnoplast-online)), p. 25-29.
- [14] Cantadore C., Agosto/Settembre 2013. Macchina completamente elettrica per packaging a stampaggio veloce eKW 38 Pi/2200 Full Electric. *Tecnoplast online* ([www.tecnoedizioni.com/tecnolpast-online](http://www.tecnoedizioni.com/tecnolpast-online)), p. 30-35.

[15] Rigon M., Aquila Service (<http://www.aquilaservice.it>), Breganze (VI), Dicembre 2013. *Presse per lo stampaggio a iniezione elettriche*. Intervista diretta.

[16] Lobba, P. Ufficio Tecnico Giflor Srl (<http://www.giflor.it/>), Grumolo delle Abbadesse (VI), Ottobre 2013. *Presse per lo stampaggio di tappi BMB*. Intervista diretta.

[17] 01 Machinery Srl (<http://www.01machinery.com>), Marzo 2014

[18] Sullivan William G., Wicks Elin M., Luxhoj James T., Milano (MI) 2006. *Economia applicata all'ingegneria*. Pearson Education Italia Srl.