

Materiali Polimerici e Compositi

5.2 – Processi di formatura

Principali processi di formatura

✓ Estrusione

2. Stampaggio per iniezione
3. Stampaggio per soffiatura
4. Formatura a caldo
5. Calandratura
6. Stampaggio x rotazione
7. Stampaggio per compressione (termoindurenti)
8. Stampaggio per trasferimento (termoindurenti)
9. Stampaggio per iniezione (termoindurenti)
10. Rapid prototyping/Stampa 3D

2. Stampaggio per iniezione

Processo in cui una materia plastica portata a rammollimento viene forzata in uno stampo cavo relativamente freddo che impartisce al materiale la forma desiderata.

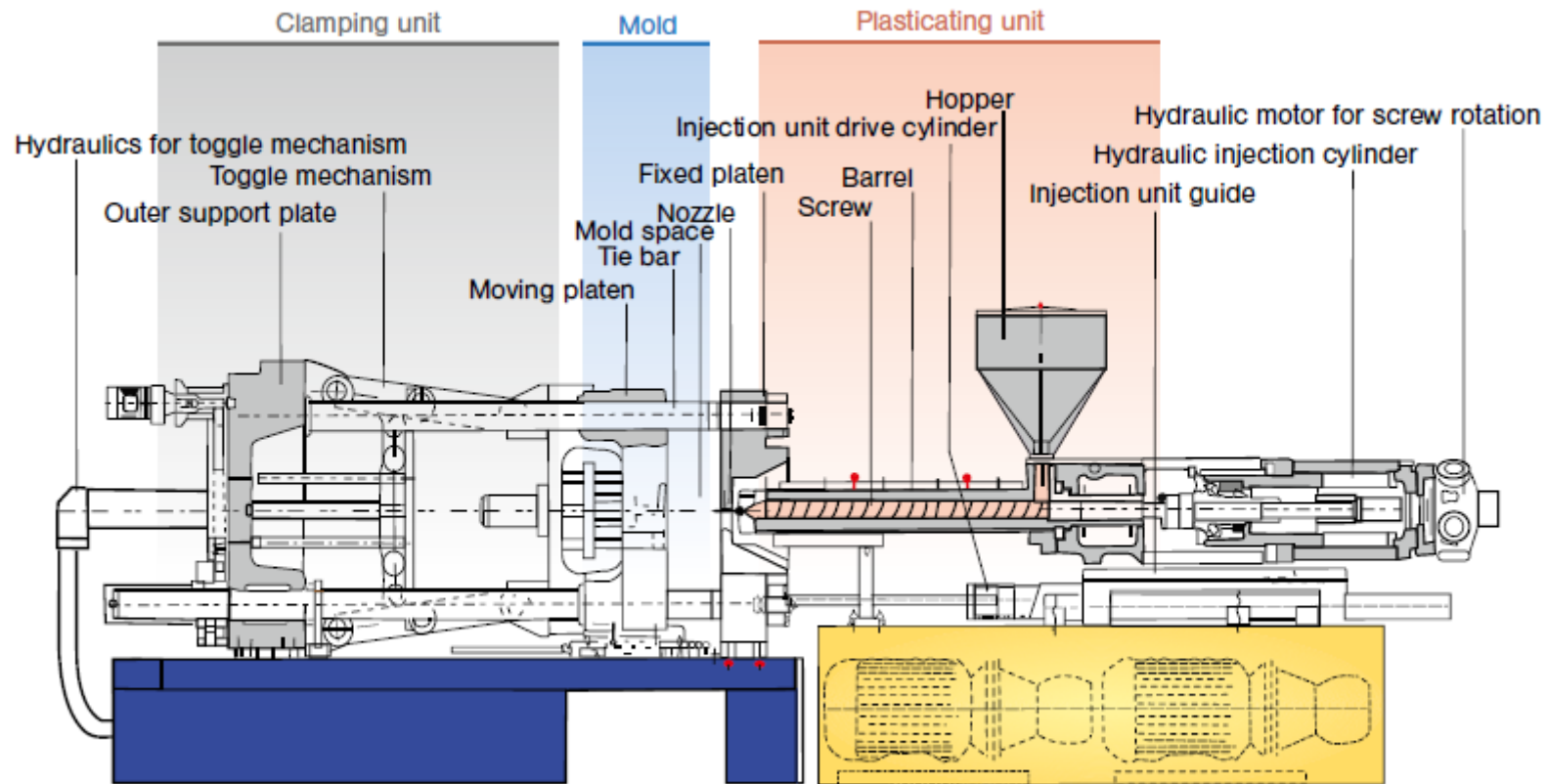
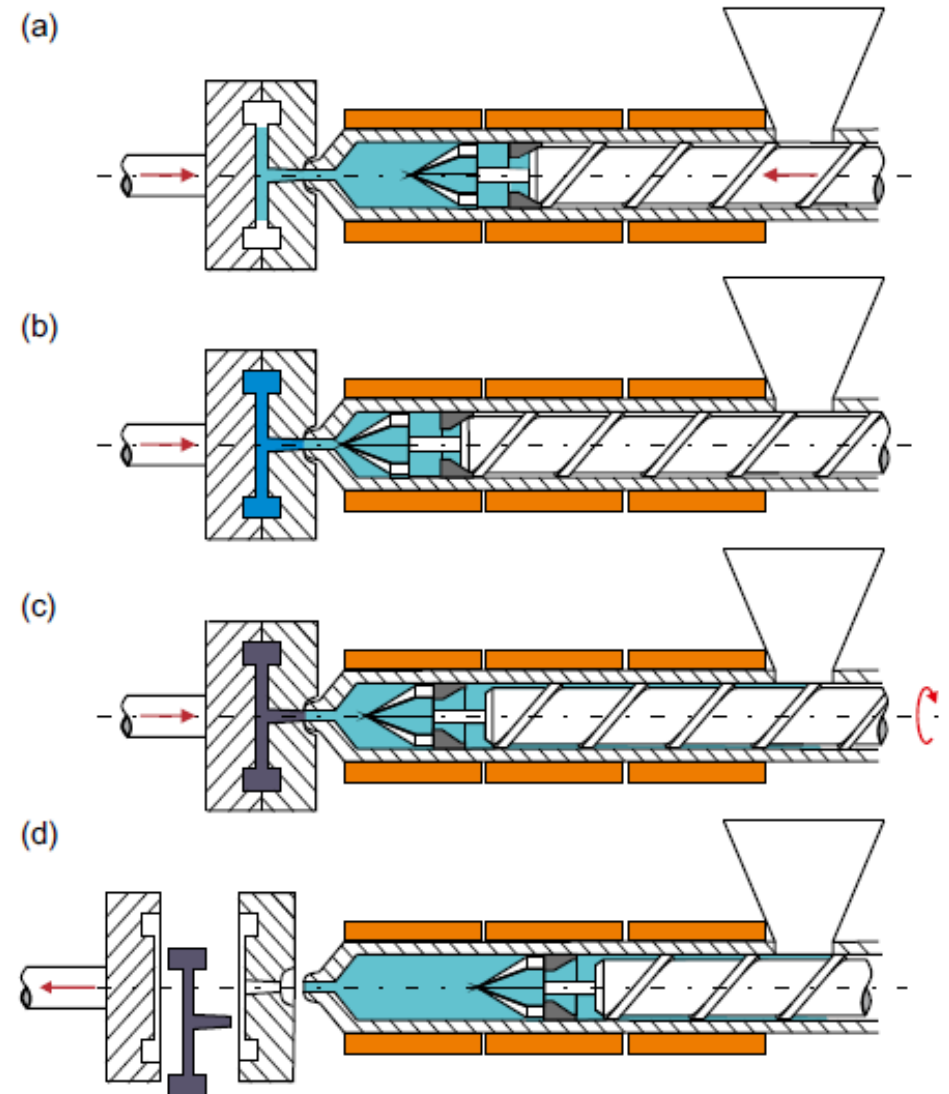


Figure 6.1 Schematic of an injection molding machine

2. Stampaggio per iniezione

- a) Lo stampo si riempie, la vite non ruota ma spinge il fuso. L'aria viene espulsa attraverso dei canali di *vent*. La valvola di non ritorno è chiusa.
- b) Stampo pieno, la vite esercita una pressione assiale di tenuta (*holding pressure*) per compensare il ritiro al raffreddamento.
- c) Viene chiuso il *gate*. La vite indietreggia e inizia a ruotare per favorire la nuova carica di materiale dalla tramoggia. La valvola di non ritorno è aperta.
- d) Dopo il raffreddamento lo stampo si apre per l'estrazione del pezzo. Lo stampo si richiude ed il ciclo ricomincia.



2. Stampaggio per iniezione

Durata del ciclo di stampaggio

$$t_{cycle} = t_{closing} + t_{cooling} + t_{ejection}$$

$t_{closing}$ e $t_{closing}$ = pochi secondi

Per una piastra di spessore h

$$t_{cooling} = \frac{h^2}{\pi \alpha} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{T_M - T_W}{T_D - T_W} \right)$$

Per un cilindro di diametro D

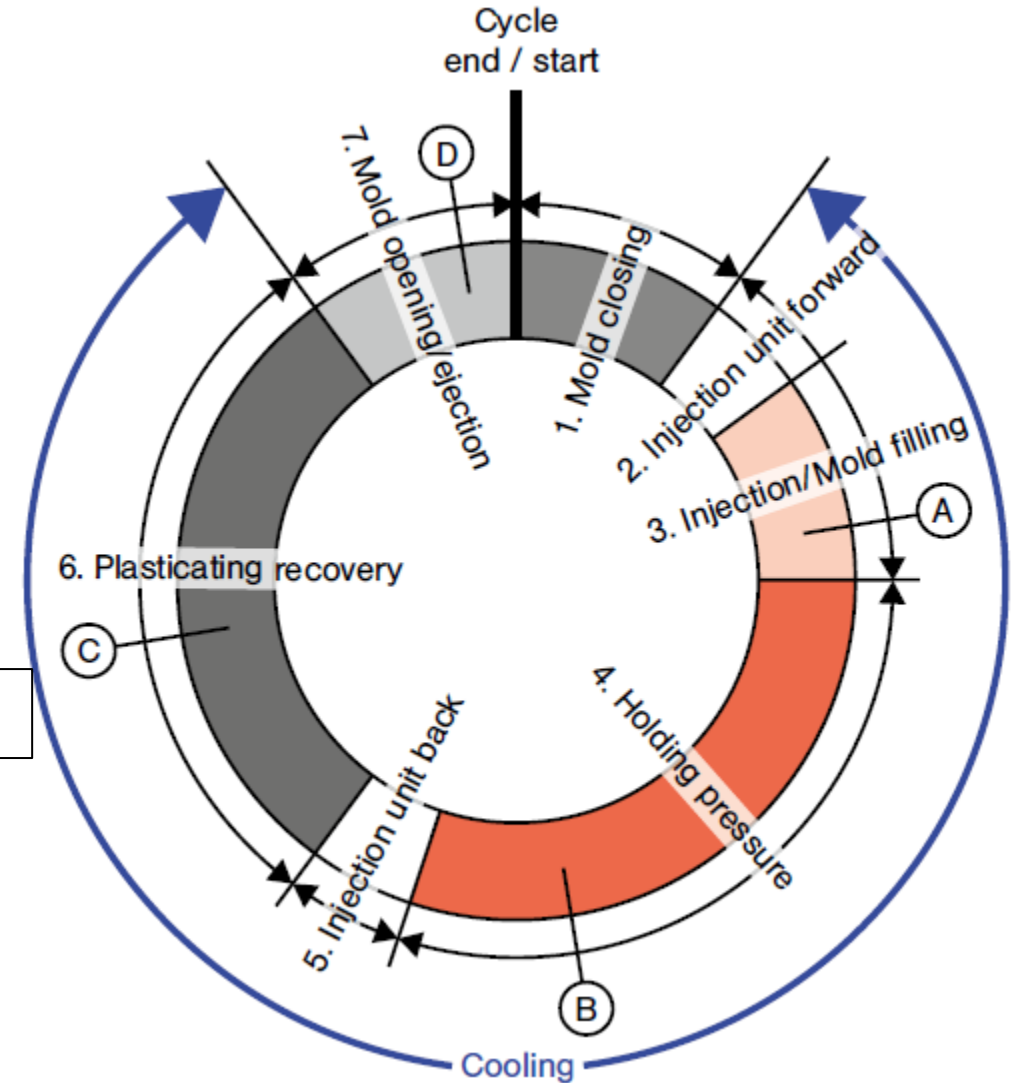
$$t_{cooling} = \frac{D^2}{23.14 \alpha} \ln \left(0.692 \frac{T_M - T_W}{T_D - T_W} \right)$$

α = diffusività termica

T_m = T del fuso

T_w = T stampo

T_D = T media del pezzo



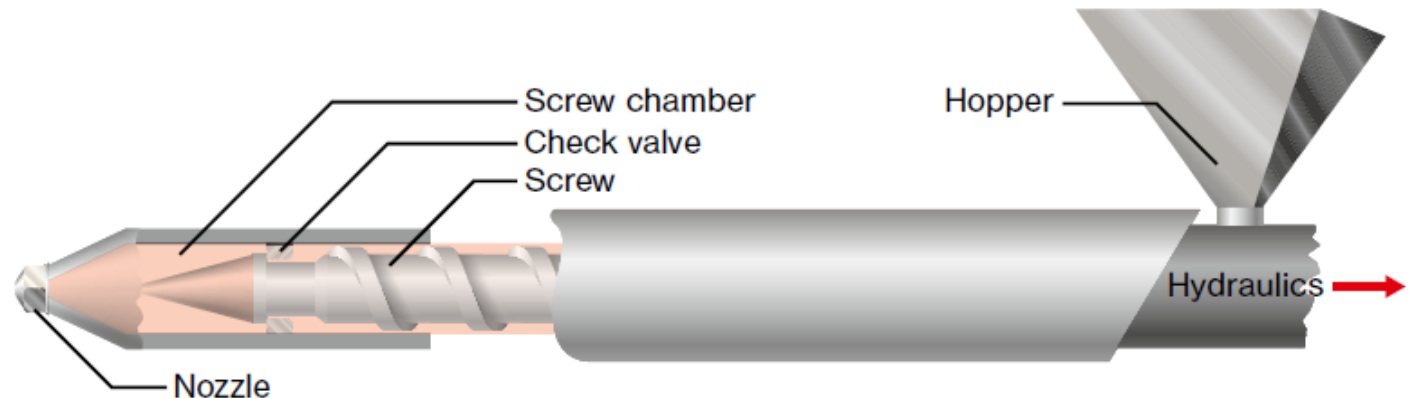
2. Stampaggio per iniezione

Caratteristiche della vite

Simili a quanto visto nel caso dell'estrusione: $L/D=15-20$, $P=200$ Mpa, ma con presenza di ***valvola di non ritorno***.

L'ugello viene avvitato in testa al cilindro ed entra in contatto con il canale di colata dello stampo (***sprue***).

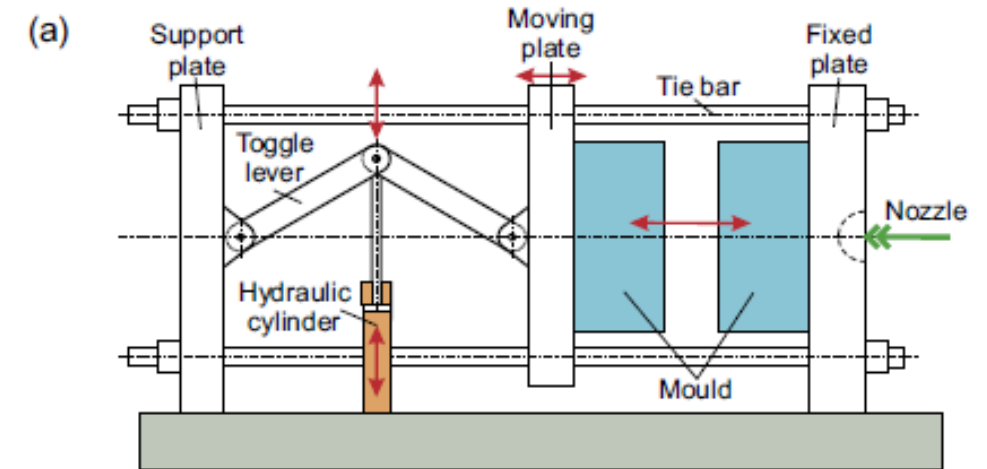
Materiale	T stampaggio
LDPE	160-250°C
HDPE	200-280°C
PP	230-300°C
PS	160-280°C
PVC	160-180°C
ABS	180-250°C
PMMA	200-250°C



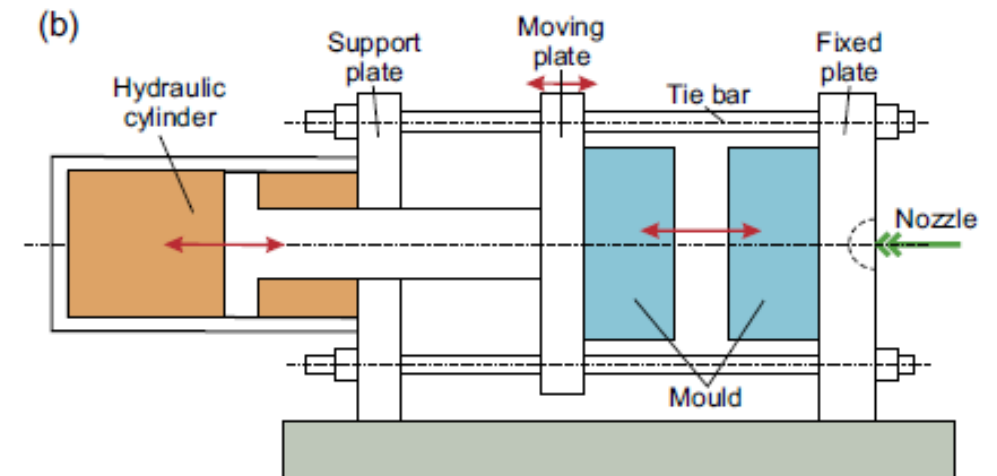
2. Stampaggio per iniezione

Sistema di fissaggio stampo

- Apre e chiude lo stampo attraverso un sistema idraulico o meccanico.
- A stampo chiuso, esercita una pressione sullo stampo per garantire la tenuta ed evitare la fuoriuscita di materiale (*flash*).



Toggle clamping system

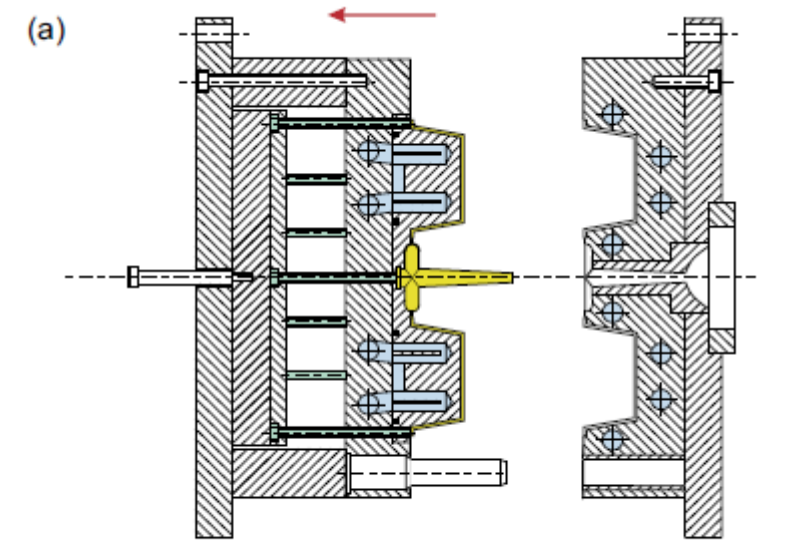


Hydraulic clamping system

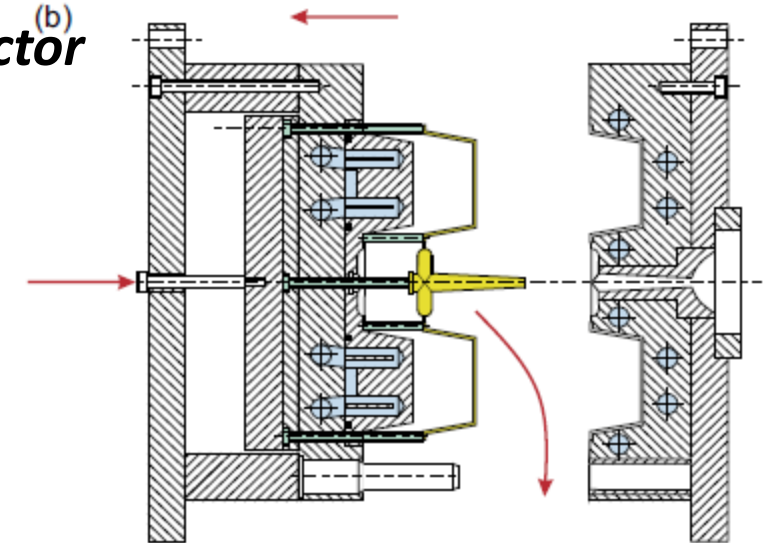
2. Stampaggio per iniezione

Caratteristiche dello stampo

- Canale di colata (*sprue*)
- Canali che collegano il canale di colate al gate (*runners*)
- Punto di ingresso nella cavità dello stampo (*gate*)
- Sistema di tenuta (*anchor pins*) ed estrazione del pezzo (*ejector pins*)
- Canali di *vent*
- Canali di raffreddamento ad acqua.



Mould opening and separation of sprue and moulding



Ejection of mouldings of parts, sprue and runners

2. Stampaggio per iniezione

Sovrastampaggio

- ▶ Materiali diversi (es. spazzolino da denti)
- ▶ Colori diversi
- ▶ Inserti (es cacciavite)
- ▶ MIM (metal injection moulding)

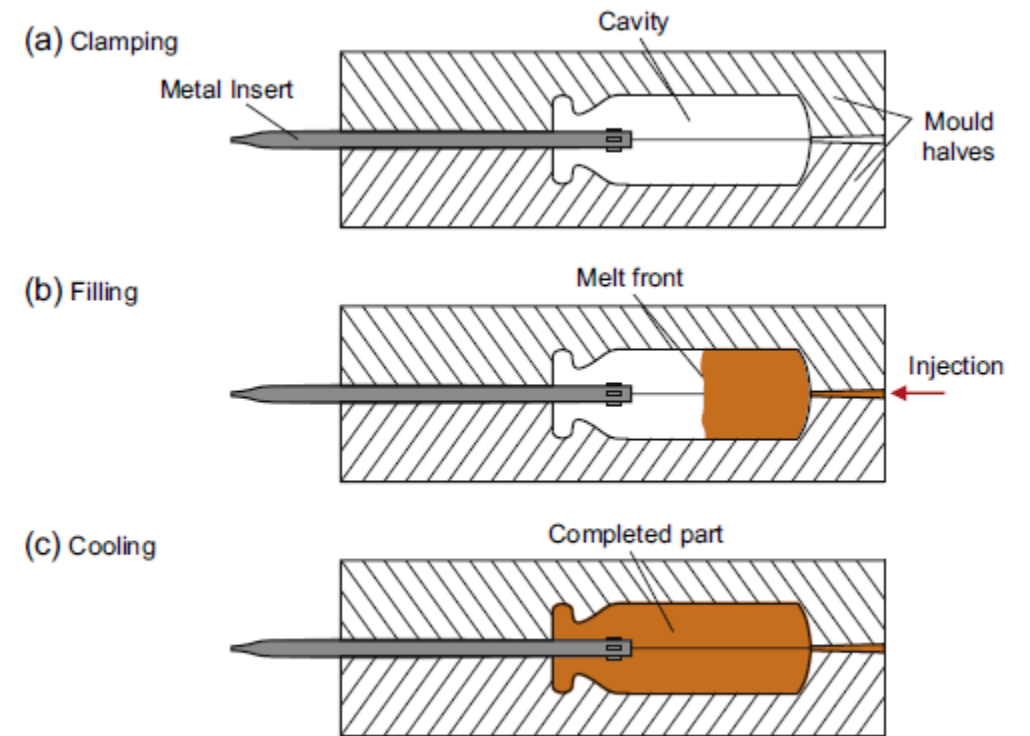


FIG. 4.57 Insert moulding.

2. Stampaggio per iniezione

Principi operativi

- Effettuare una sola modifica alla volta.
- Lasciare che la macchina si stabilizzi per un periodo di 10-20 cicli dopo ogni singola modifica apportata al processo.
- Essiccazione dei granuli: almeno 2 ore alla temperatura consigliata dal fornitore prima di utilizzarlo.
Non utilizzare mai un materiale direttamente "dal sacco", anche se il fornitore dichiara che sarebbe abbastanza asciutto da poter essere utilizzato in questo modo.
- Temperatura del cilindro: impostare la zona posteriore come più fredda e la zona anteriore come più calda, con incrementi di 5-6°C.
- Temperatura del fuso: una variazione di 5-6°C richiederà 10 cicli prima che la temperatura della canna si stabilizzi completamente.

2. Stampaggio per iniezione

Principi operativi

- Pressione e velocità di iniezione: modificare i parametri con incrementi non superiori al 10% del valore iniziale. Tra una regolazione e l'altra, lasciare che la macchina si stabilizzi per 10 cicli completi.
- N° giri vite: iniziare a 100 giri/min e regolare con incrementi di 10 giri/min.
- Temperatura dell'ugello: la temperatura dell'ugello deve essere impostata in modo da essere al massimo entro 5-6°C rispetto alla zona anteriore (più calda) del cilindro. Le modifiche devono essere effettuate con incrementi non superiori a 0,5°C.

2. Stampaggio per iniezione

Principi operativi

- Tempo di mantenimento della *holding pressure*: utilizzare una pressione assiale di tenuta per un minimo di 2 secondi. Aumentare con incrementi di 0,5 secondi. Il tempo di mantenimento della pressione deve essere sufficiente per solidificare l'area del *gate*.
- Tempo di ciclo: un pezzo con uno spessore massimo della parete di 0,25 cm dovrebbe avere un tempo di raffreddamento di 15 secondi e un tempo di ciclo complessivo di 20 - 25 secondi.
- Regolazione del tempo di ciclo: regolare i tempi di ciclo con incrementi del 5%. Pertanto, per un ciclo di 30 secondi, ogni singolo aumento o diminuzione del ciclo non dovrebbe superare 1,5 secondi. Lasciare un minimo di 10 cicli per la stabilizzazione tra ogni regolazione del ciclo.

2. Stampaggio per iniezione

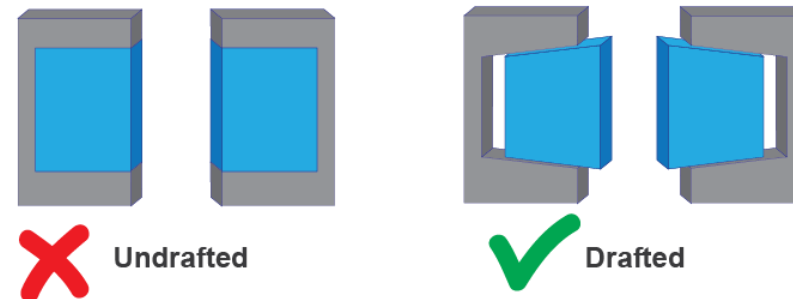
Principi operativi

- Contropressione (quando la vite indietreggia): iniziare con 3,5 bar e aumentare con incrementi di 1 bar. Non superare i 35 bar.
- Sistema di fissaggio stampo: determinata come l'area proiettata del pezzo da stampare x 8 kg/mm². Aggiungere un ulteriore 5% per ogni centimetro di spessore del pezzo e un fattore di sicurezza del 10%.
- Gate: da posizionare in corrispondenza di una sezione spessa prima che in una sezione sottile.
- Dimensioni del gate: almeno pari al 50% dello spessore della parete in cui viene posizionato.

2. Stampaggio per iniezione

Principi operativi

- Temperatura dello stampo:
 - una variazione di 5-6°C della temperatura dello stampo richiederà 20 cicli prima che la temperatura dello stampo si stabilizzi. Uno stampo in alluminio richiederà solo 1 ciclo.
 - Un pezzo stampato cercherà sempre di rimanere nella metà più calda dello stampo.
 - Tenendo presente questa considerazione, è possibile controllare la deformazione e l'incollaggio. Uno stampo caldo produrrà un pezzo con una finitura più lucida di un altro.
- Angolo di sforno: almeno 1° per parete.



2. Stampaggio per iniezione

Principi operativi

- Venting: ogni sfiato dello stampo deve avere una larghezza minima di 0,3 cm. Le aperture devono essere sufficienti a coprire il 30% del perimetro misurato attorno alla linea di separazione dello stampo.
- Variazione di sezione del pezzo da stampare: < 25%.
- Purging: quando si passa a un nuovo materiale o a un nuovo colore, sono necessari circa 20 cicli completi di spurgo. Il ciclo di spurgo deve avere la stessa tempistica del normale ciclo di produzione (e non più veloce!).
- Materiale rimacinato (rigenerato): è possibile aggiungere fino al 20% di rimacinato al materiale vergine, a seconda della sensibilità termica del materiale. Qualsiasi valore superiore al 20% deve essere valutato attentamente. Naturalmente, ciò presuppone che il rimacinato sia di alta qualità e non degradato.

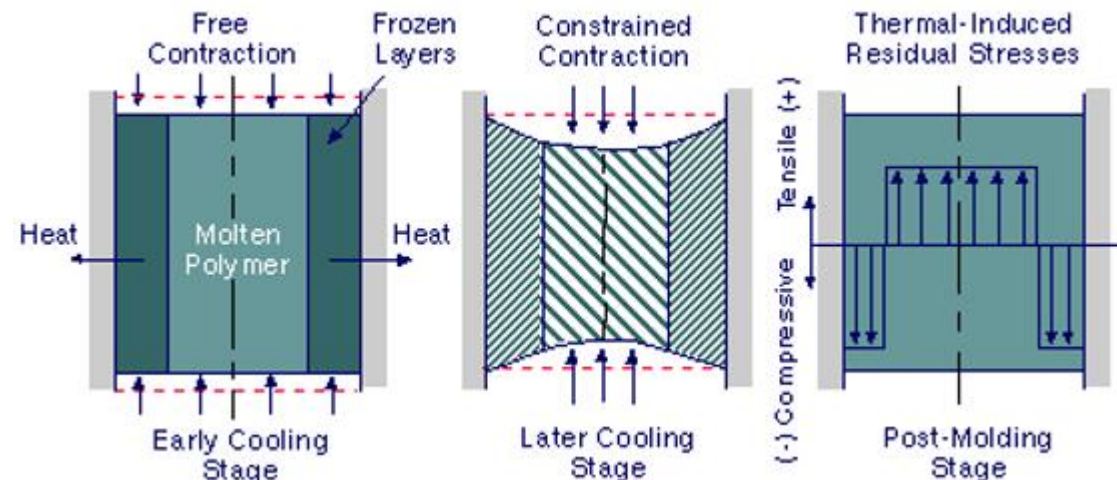
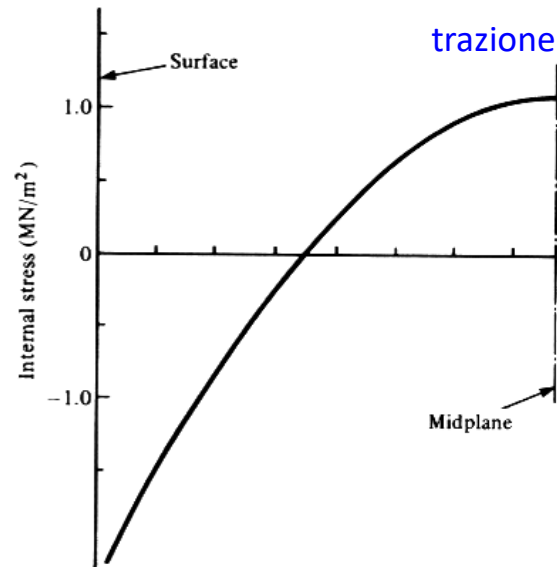
2. Stampaggio per iniezione – Ritiro e tensioni residue

Ritiro (Shrinkage): Durante il processo di raffreddamento, la dimensione lineare del prodotto finale è minore di almeno il 2% rispetto al fuso.

Tensioni residue: A causa dei tempi diversi di raffreddamento tra superficie e cuore, sia per prodotti estrusi che per quelli formati ad iniezione, o in stampo, si instaurano *tensioni residue*

Es.: raffreddamento di una lastra piana

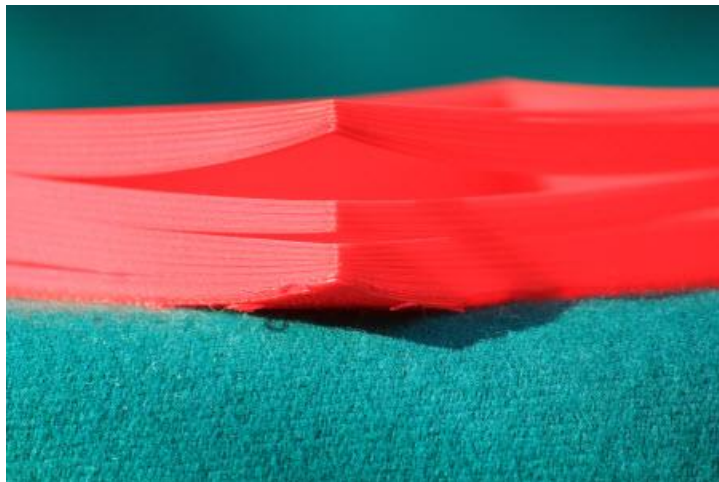
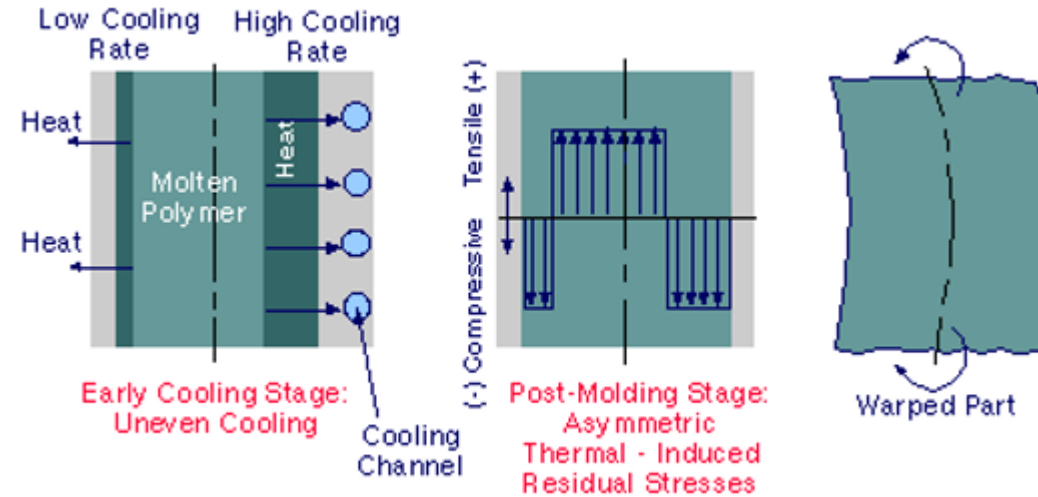
Sulla superficie che solidifica prima si sviluppano sforzi di **compressione**, mentre al centro ci saranno sforzi di **trazione**:



Compressione
Stress residui in una
barra di PS

2. Stampaggio per iniezione – Ritiro e tensioni residue

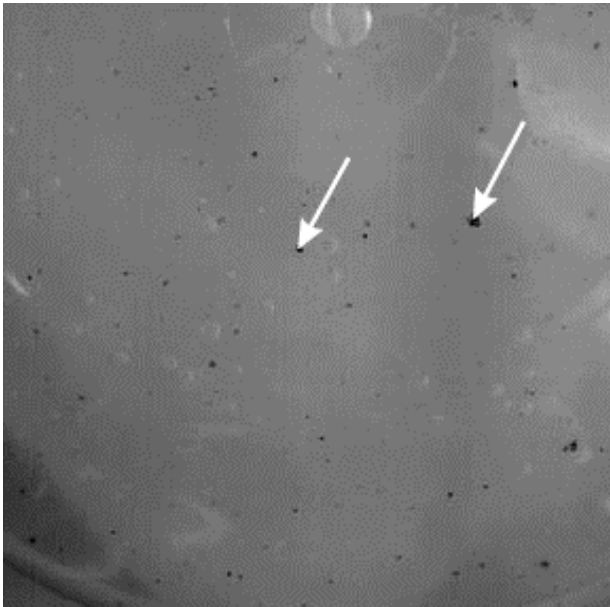
Distorsioni: In caso di il raffreddamento non simmetrico.



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

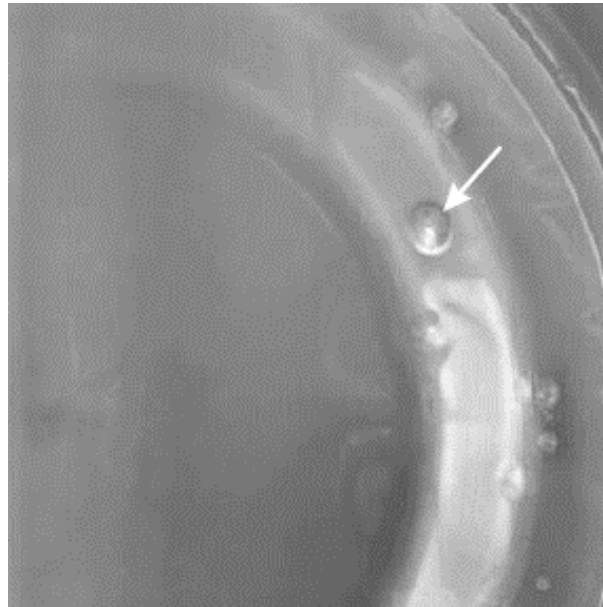
Black Specks or Streaks

Specks are caused by overheating or contamination of the material.



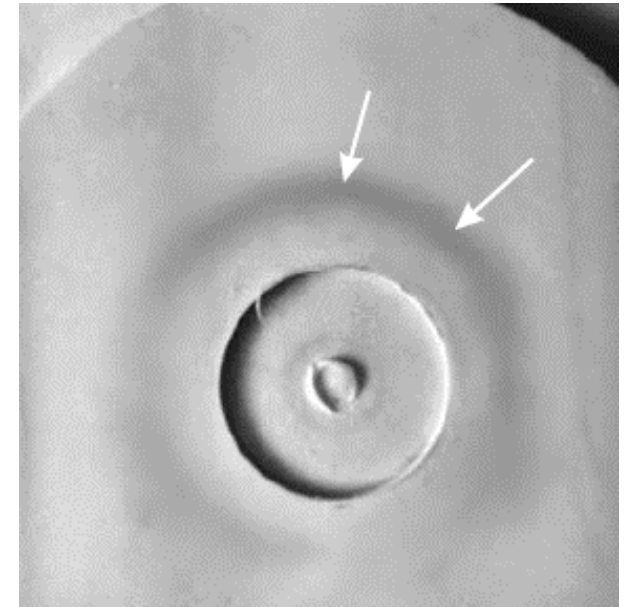
Blisters

Trapped air resulting from process deficiencies causes blistering



Blush

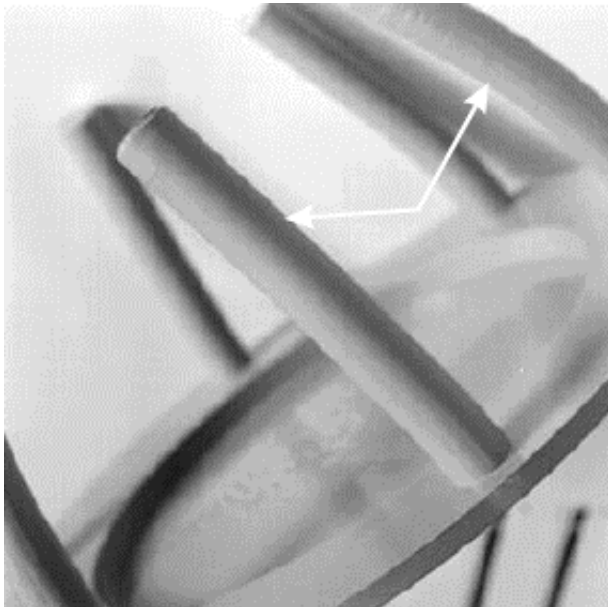
Blush can result from density, temperature, pressure, and cycling shortfalls.



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

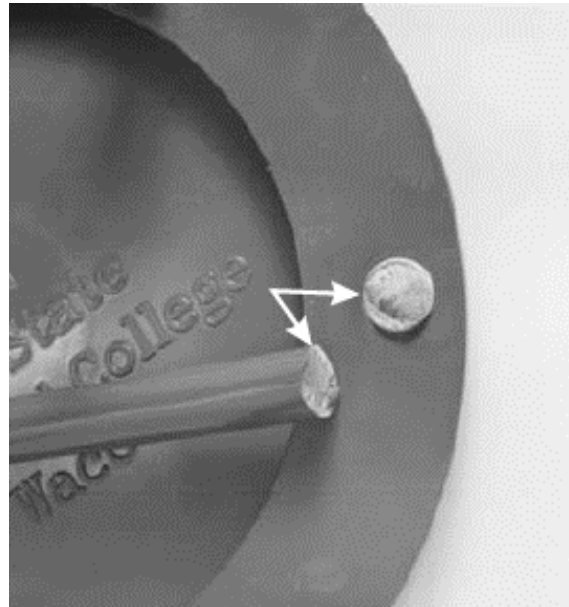
Bowing

Clamp opens too quickly (distortion)



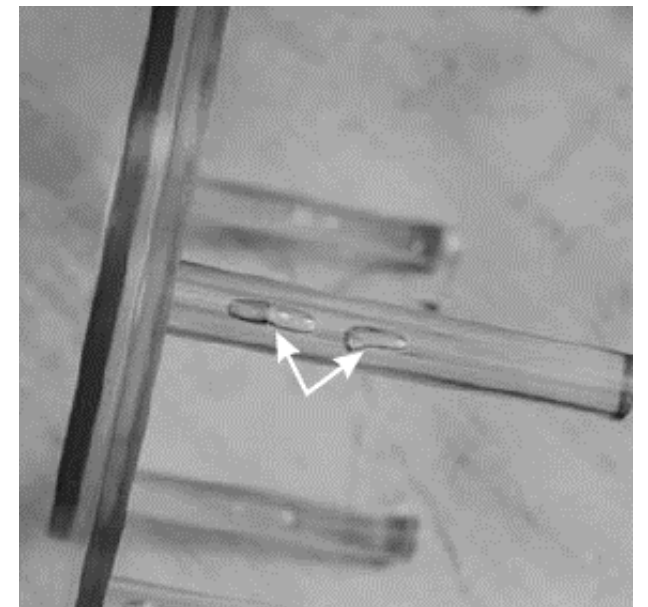
Brittleness

Melt, mix, moisture, and molding inconsistencies cause brittleness



Bubbles (Voids)

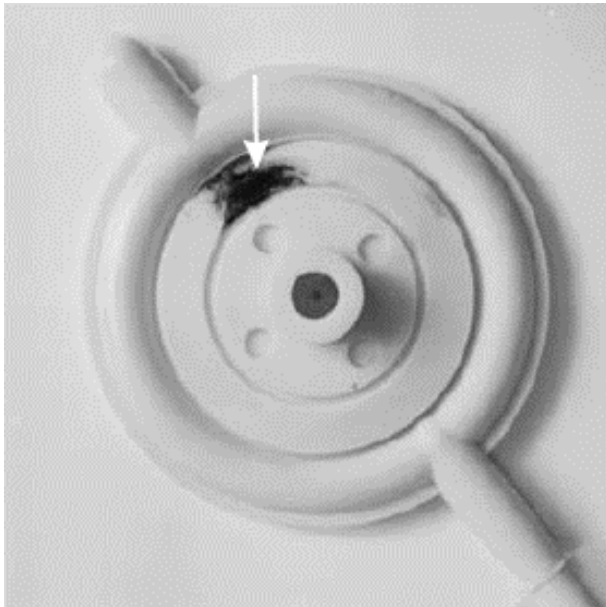
Bubbles form as the result of air or gases trapped in the melt



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

Burn Marks

Heat buildup during molding can ignite material and create burn marks



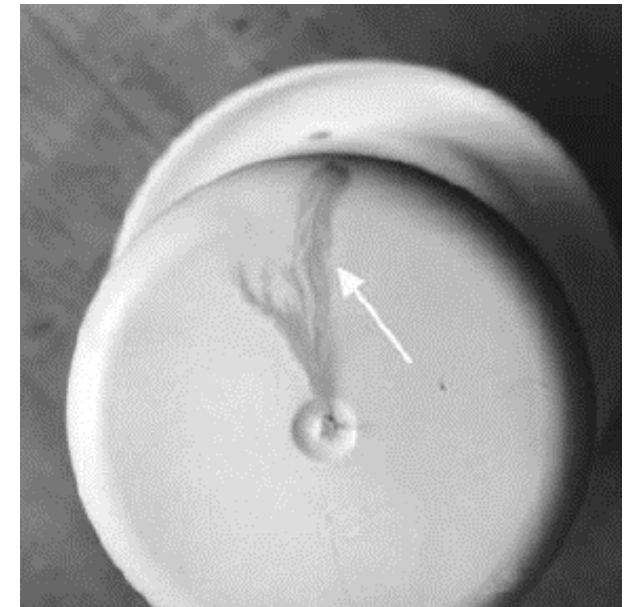
Cloudy Appearance

Improper melting of material



Contamination

Good maintenance and housekeeping can prevent material contamination



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

Cracking

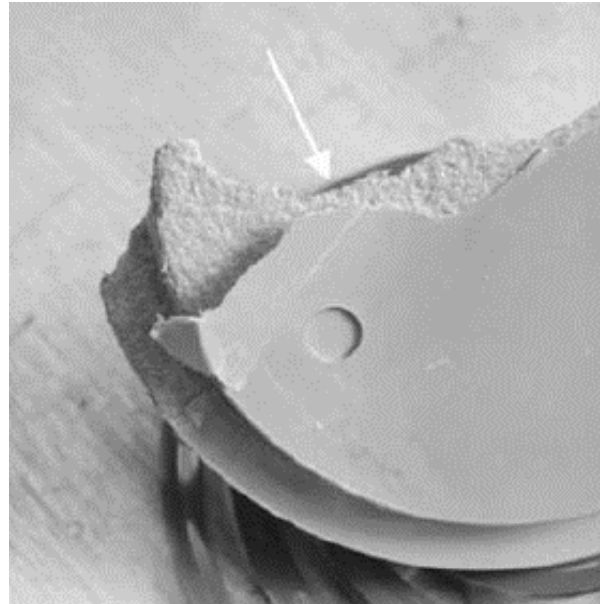
(the same is valid also for crazing)

Cracking can be caused by the machine, the mold, the material, or the operator.



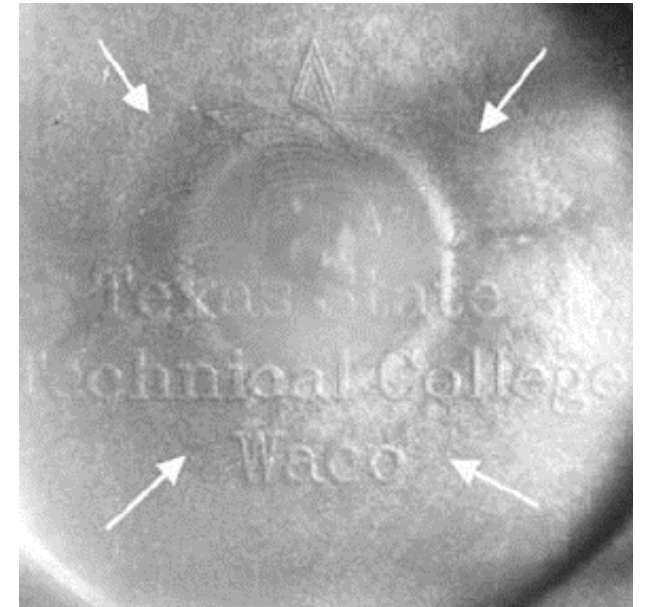
Delamination

Insufficient bonding is the principal cause of delamination



Discoloration

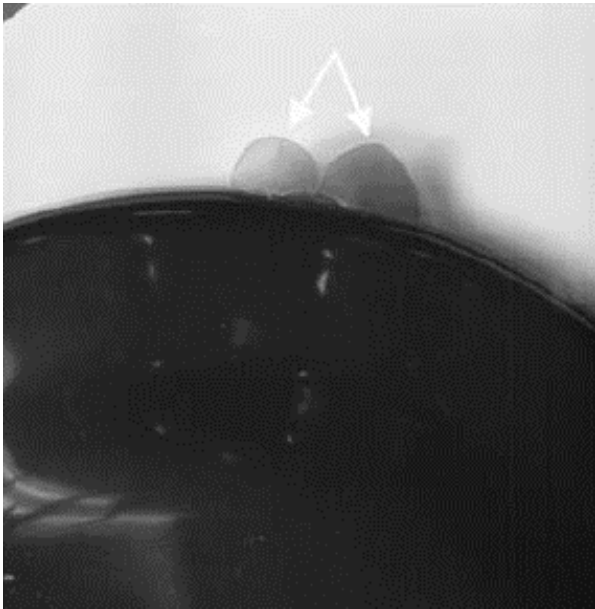
improper mold temperature:
hot = denser and darker material
cold = lighter material



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

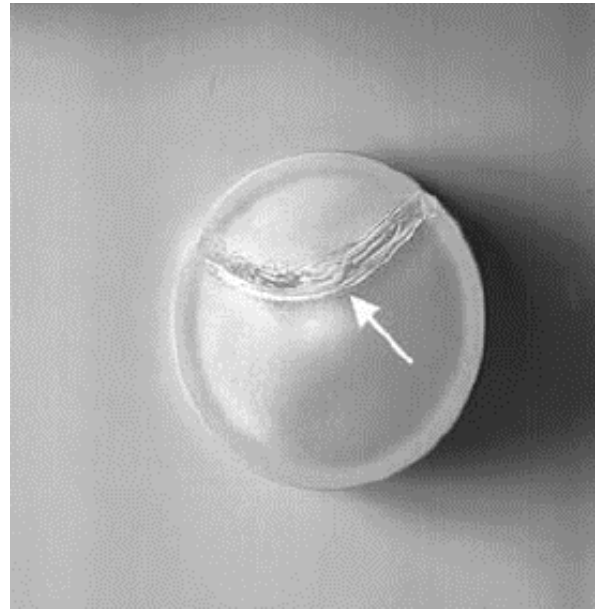
Flash

Seepage called flash can result from improper injection pressure, mold design, and material flow rates



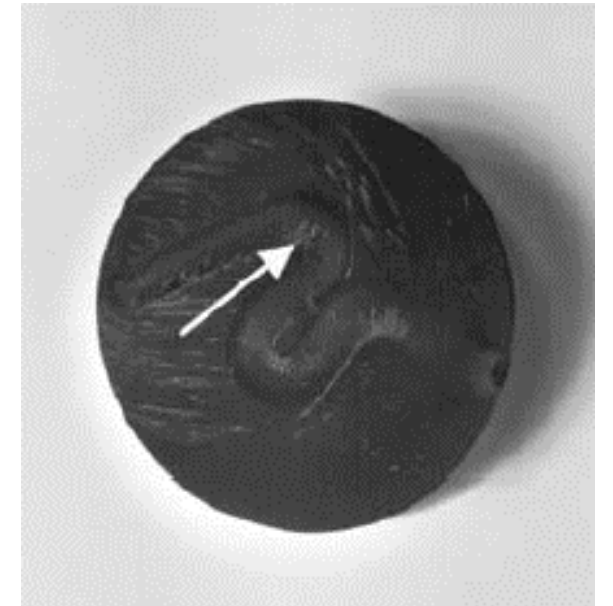
Flow lines

Improper pressure, temperature, and flow rate



Jetting

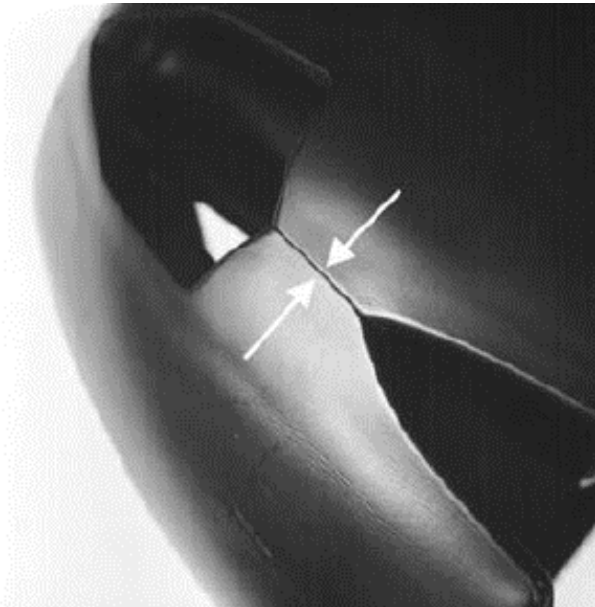
Flow rate, mold gate location, and injection speed can be the source of the jetting effect



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

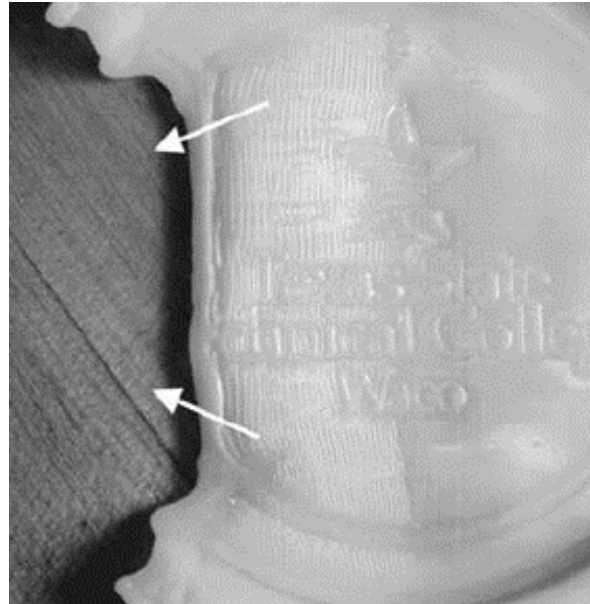
Knit Lines (Weld Lines)

Knit lines form when material is not hot enough to reform around an obstacle



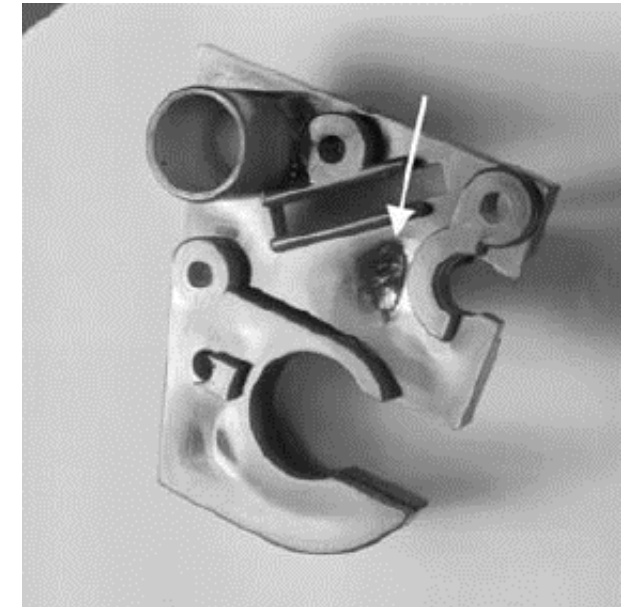
Nonfill (Short Shots)

Short shots are caused by feed, venting, flow rate, and molding consistency problems



Shrinkage (Excessive)

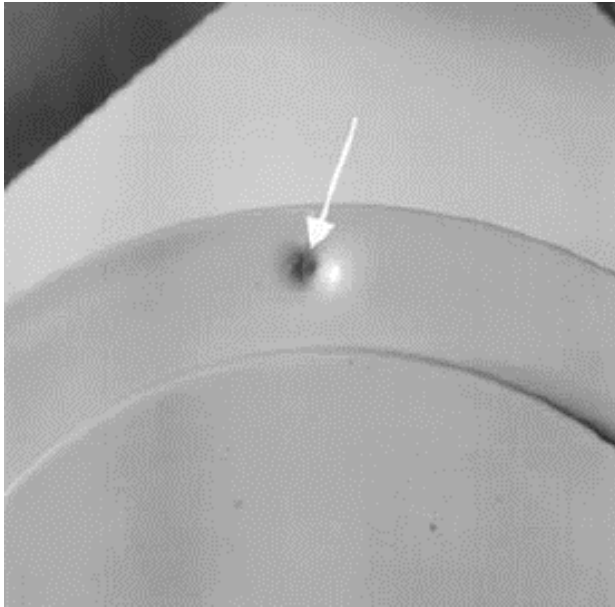
Careful control of temperature and flow rate can prevent excessive shrinkage



2. Stampaggio per iniezione - Difetti

Sink marks

Shrinkage and collapsing after cooling



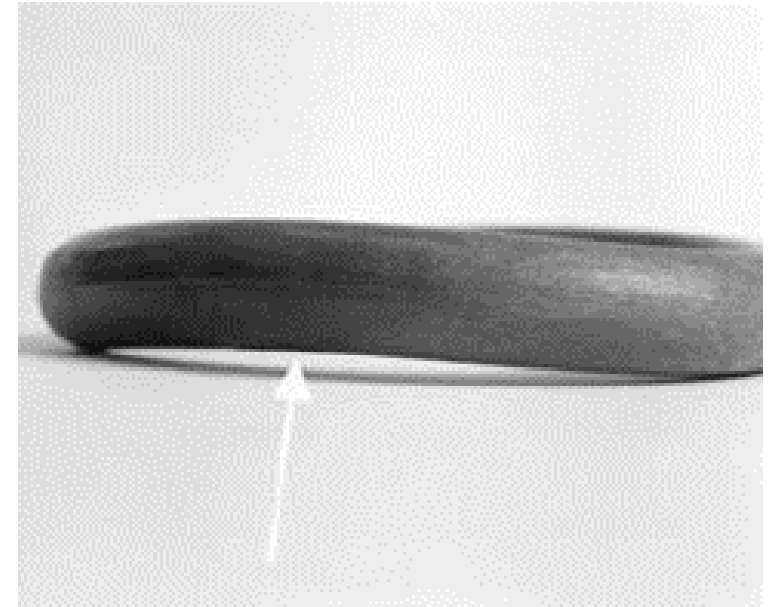
Splay (Silver Streaking)

High material T, improperly sized gates, and excessive moisture



Warpage

Improper flow rates and premature cool-down contribute to unacceptable warpage



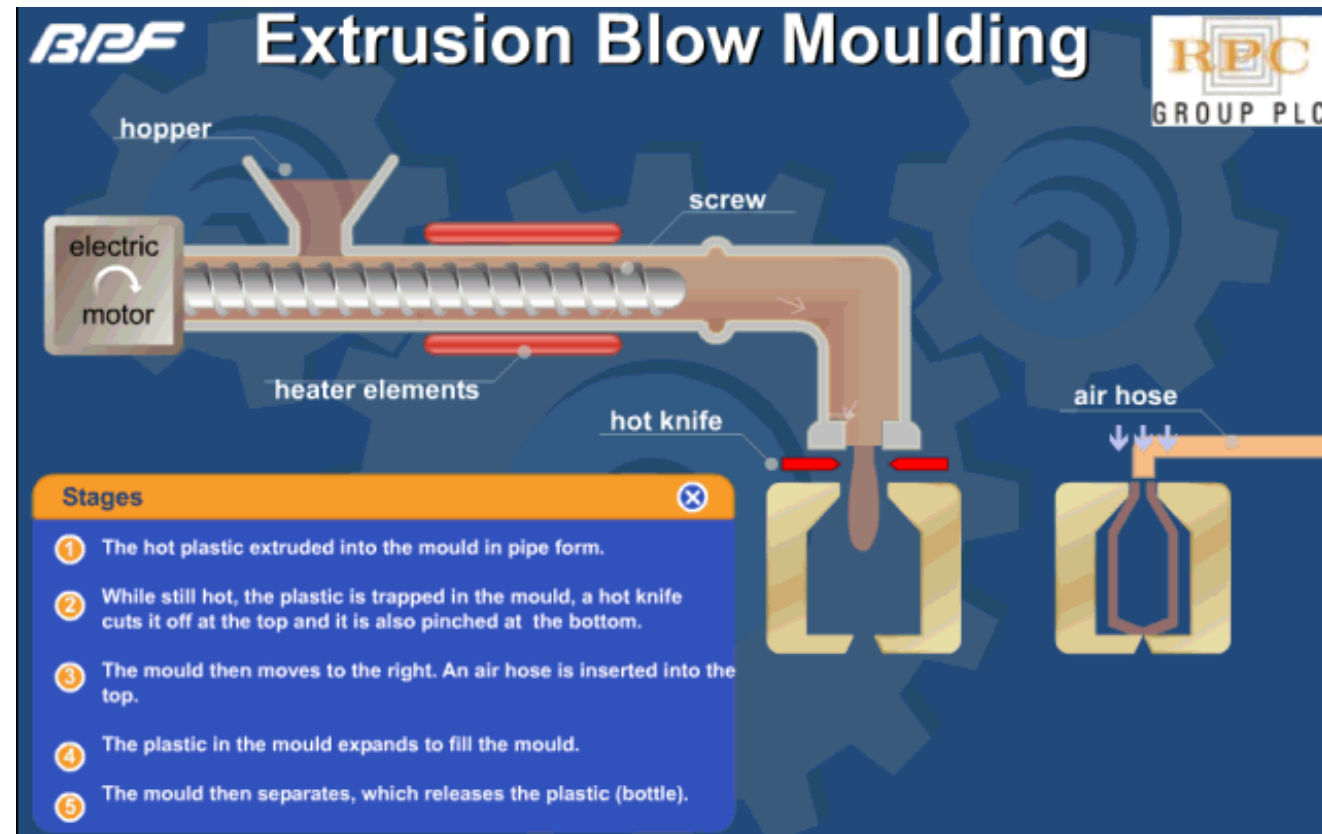
3. Stampaggio per soffiatura

Metodo di fabbricazione delle materie plastiche in cui un tubo cavo viene forzato e formato all'interno di uno stampo cavo per azione della pressione interna di aria.

Caratteristiche principali:

- Durata iniezione: 20 sec
- Durata soffiaggio: 7 sec.

La combinazione di tali processi produttivi è stata ottimizzata nel corso degli anni per le bottiglie in PET destinate a diventare degli imballaggi alimentari, settore che richiede materiali capaci di accoppiare un'ottima trasparenza alle proprietà barriera.



3. Stampaggio per soffiatura

Step 1: realizzo preforma per stampaggio ad iniezione, con **rapido raffreddamento** della preforma dopo lo stampaggio a iniezione.

In questa maniera ottengo un **basso grado di cristallinità** e **cristalliti molto piccoli**, più piccoli della lunghezza d'onda della luce che garantiscono quindi un'elevata trasparenza dei prodotti.

Nel processo di stampaggio è possibile aggiungere **agenti nucleanti** che permettono al PET di cristallizzare a temperature più elevate (ovvero con minor sottoraffreddamento), di avere sferuliti più piccoli grazie ad una nucleazione eterogenea, di minimizzare gli stress introdotti durante il processo di produzione e di migliorare la qualità ottica del prodotto finale.

Un materiale maggiormente cristallino è più denso, offre migliori proprietà barriera e risulta meno suscettibile al fenomeno di *crazing*.

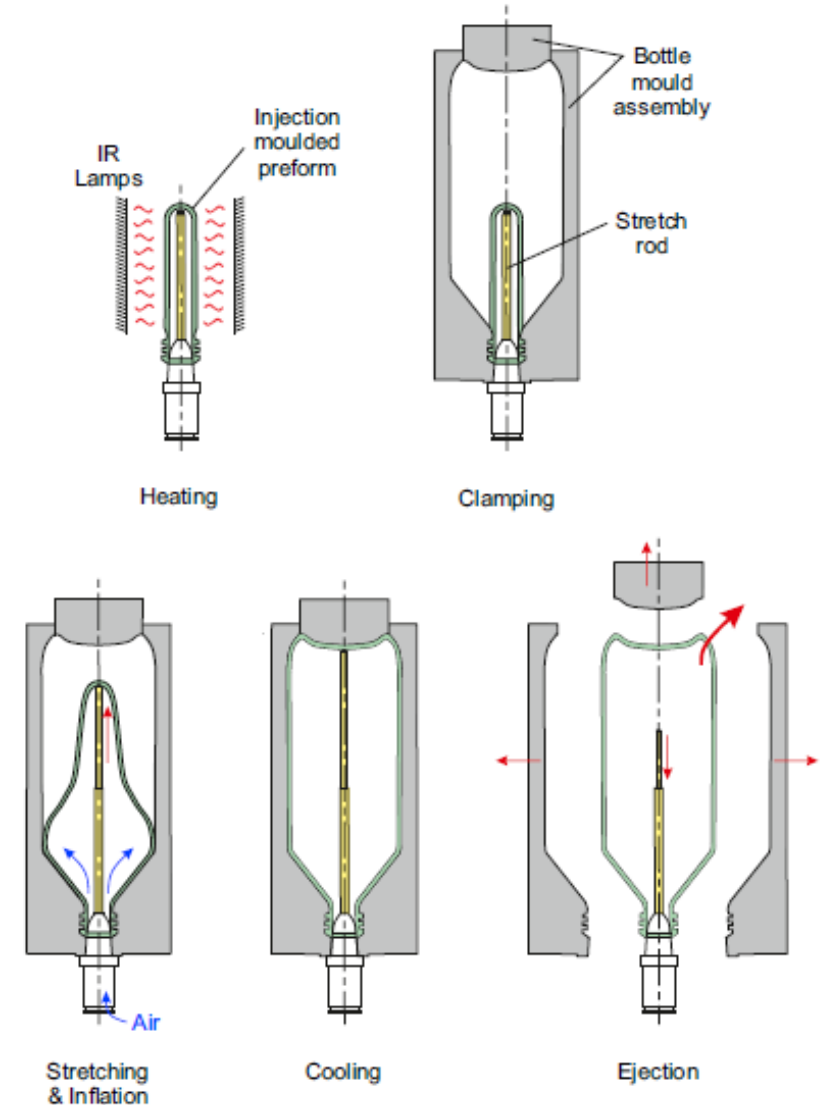


3. Stampaggio per soffiatura

Step 2: riscaldamento e soffiatura durante il quale avviene il fenomeno di ***strain-induced crystallization***.

Solitamente, le bottiglie vengono processate all'interno della finestra ottimale al di sopra della transizione vetrosa ($\approx +70^{\circ}\text{C}$) e al di sotto della temperatura di cristallizzazione ($\approx +130^{\circ}\text{C}$) in modo da ottenere prodotti trasparenti e con una cristallinità finale attorno del 20-25%.

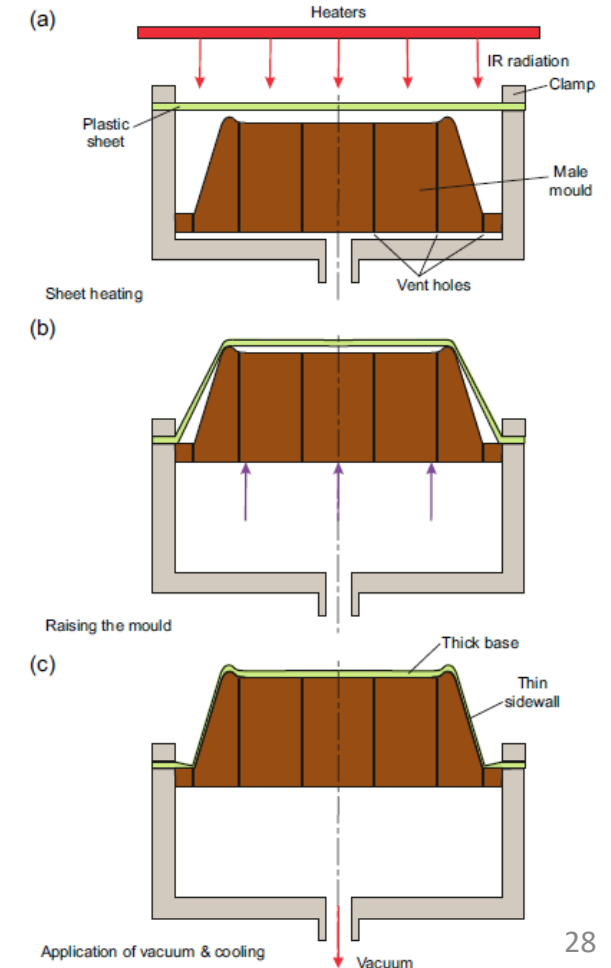
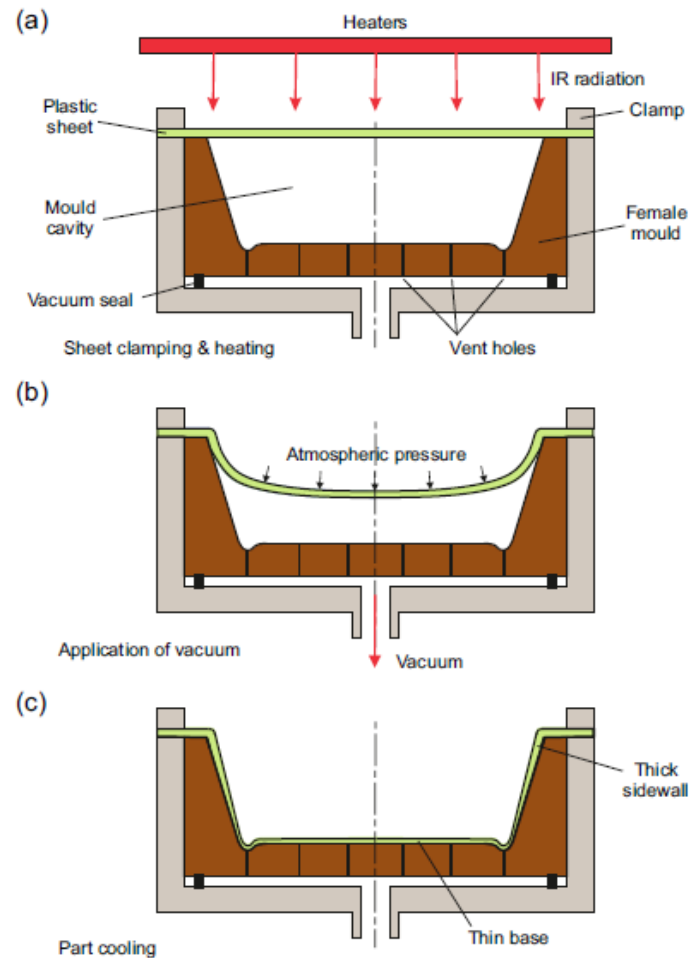
La cristallizzazione indotta dalla deformazione migliora le proprietà barriera, la resistenza agli urti e la stabilità dimensionale.



4. Formatura a caldo

Processo in cui una foglia/lastra riscaldata viene fatta aderire ad uno stampo che riproduce la forma del manufatto finale.

Materiali	T formatura
LDPE	120-140°C
HDPE	130-150°C
PP	150-180°C
PS	150-170°C
PVC	140-160°C
ABS	150-180°C
PMMA	150-170°C

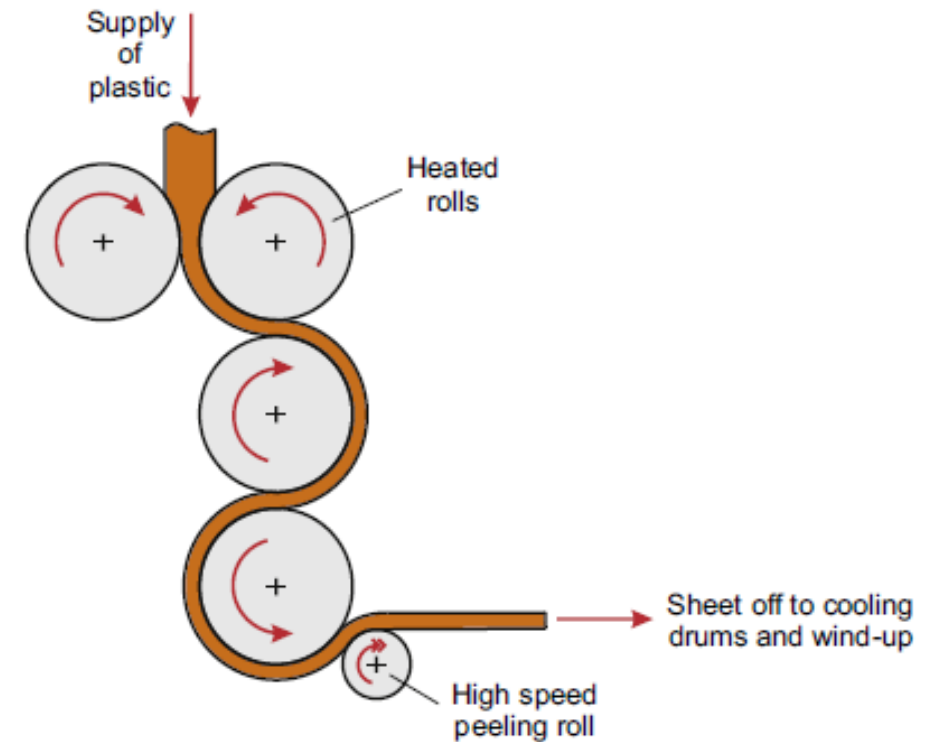


5. Calandratura

Processo in cui una materia plastica portata viene forzata attraverso una o più coppie di cilindri riscaldati che effettuano la laminazione fino allo spessore richiesto (foglie e lastre di spessore sottile).

Caratteristiche principali:

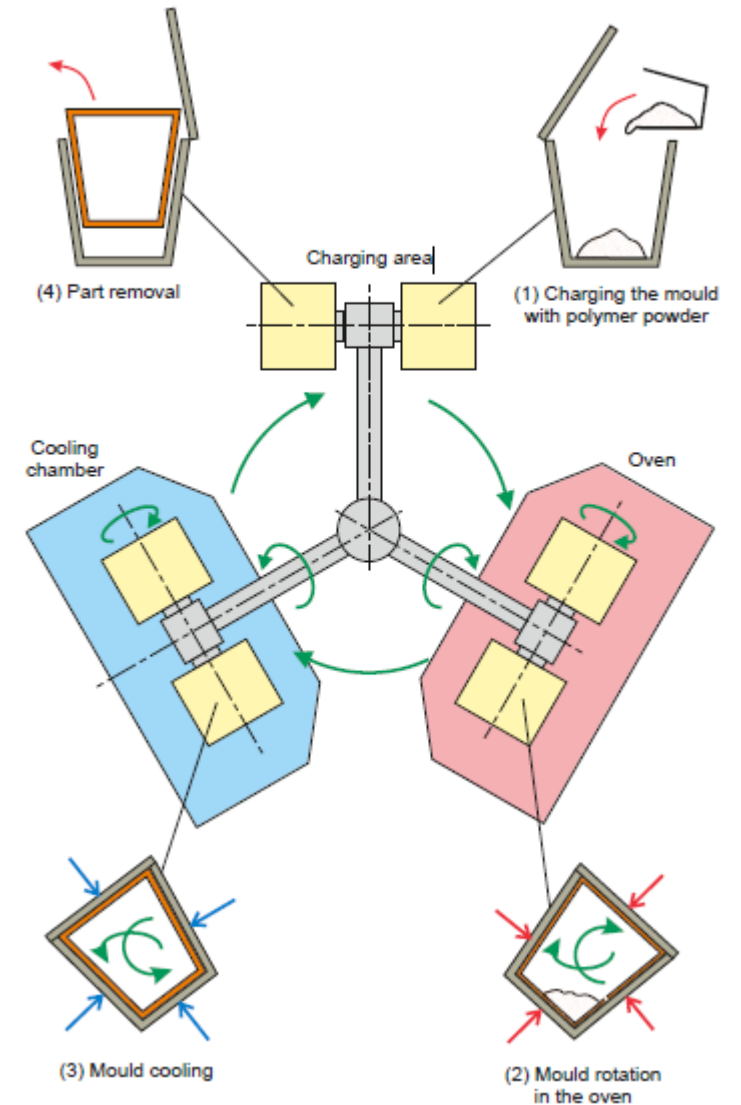
- Controllo di T nei primi due rulli (fino a 200°C)
- Velocità variabili tra 0.1-2 m/s, in funzione dello spessore voluto
- Ottima accuratezza di spessore (± 0.005 mm)



6. Stampaggio per rotazione

Processo utilizzato per produrre articoli cavi di grandi dimensioni.

- ▶ Alimentazione di una quantità pesata di polimero in metà stampo
- ▶ Chiusura stampo
- ▶ Riscaldamento in forno e contemporanea rotazione biassiale
- ▶ Raffreddamento (aria + spruzzatura acqua)



6. Stampaggio per rotazione

- ▶ Velocità di rotazione bassa $\rightarrow < 20 \text{ rpm}$
- ▶ Riscaldamento con IR, liquidi caldi, fiamma libera (gas), convezione aria calda $\rightarrow T = 250\text{-}450^\circ\text{C}$
- ▶ Cicli lunghi $\rightarrow 30 \text{ minuti!!}$ (dipende dalle dimensioni)
- ▶ Spessori anche elevati $\rightarrow > 10 \text{ mm}$
- ▶ Basse tensioni residue (dipende dalla velocità di raffreddamento, che può essere bassa)

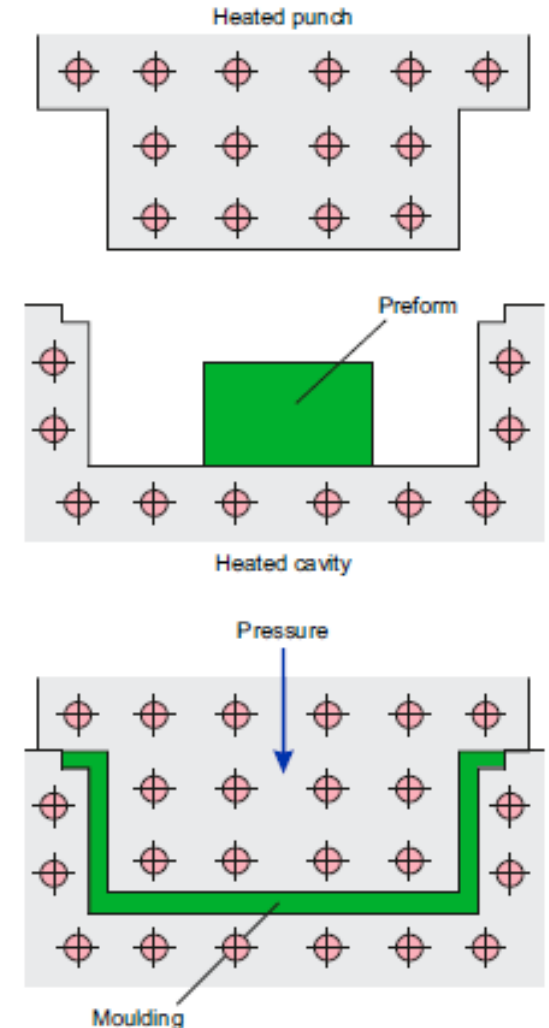


7. Stampaggio per compressione - (termoindurenti)

Processo principalmente per termoindurenti, ma anche per termoplastici e elastomeri.

Caratteristiche principali:

- Stampo e controstampo riscaldati: $T = 130-200^{\circ}\text{C}$
- Pressione: $P = 7 - 25 \text{ Mpa}$
- *Preform* = termoindurente parzialmente polimerizzato (**gelificato**) → Cura (reticolazione completa) in stampo.



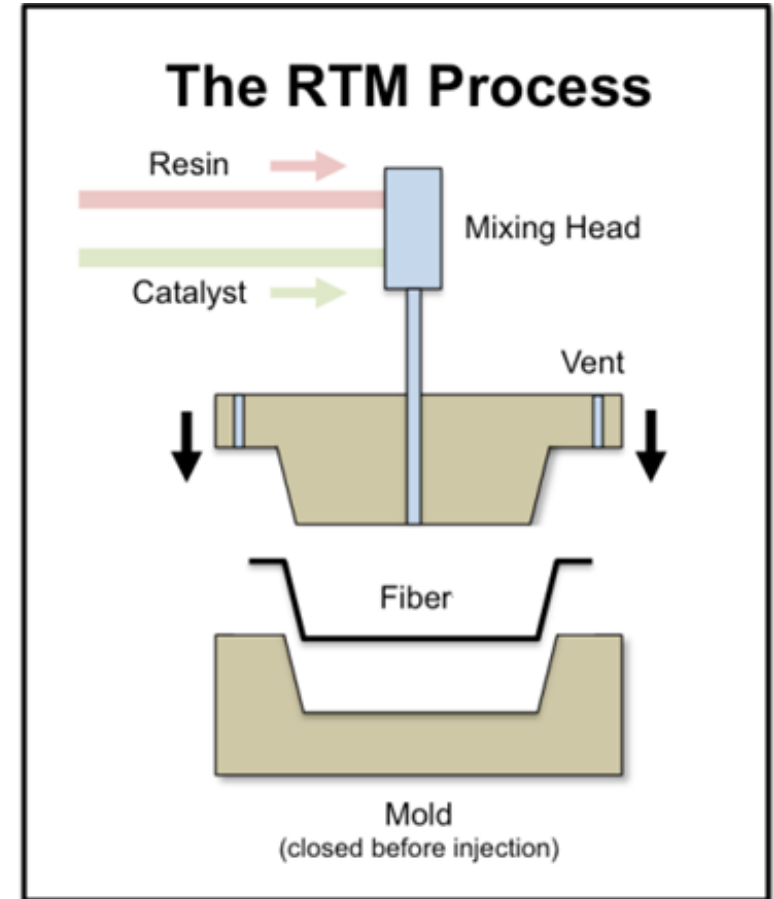
8. Stampaggio per trasferimento - (termoindurenti)

Processo in cui la miscela resina+catalizzatore viene iniettata sotto pressione elevata in uno stampo riscaldato dove avviene la reticolazione.

Simile a stampaggio per compressione, ma compressione in camera separata e iniezione nello stampo (spesso a multicavità).

Caratteristiche principali:

- Migliore distribuzione di T → accelerazione della cura
- Stampo riscaldato a 150 – 200°C per la cura e ciclo più corto.



9. Stampaggio per iniezione - (termoindurenti)

Simile a quanto avviene per i termoplastici.

Caratteristiche principali:

- Alimentazione: materiale parzialmente polimerizzato + cariche + additivi
- Elica: sezione costante per evitare bloccaggi
- Temperatura cilindro: bassa (80-110°C) per evitare reticolazione
- Pressione: alta, causa l'elevata viscosità (200 MPa).

10. Rapid prototyping/Stampa 3D

La prototipazione rapida è un insieme di tecniche industriali per la realizzazione fisica di un prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (CAD).

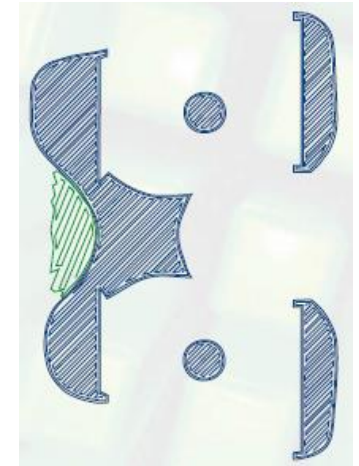
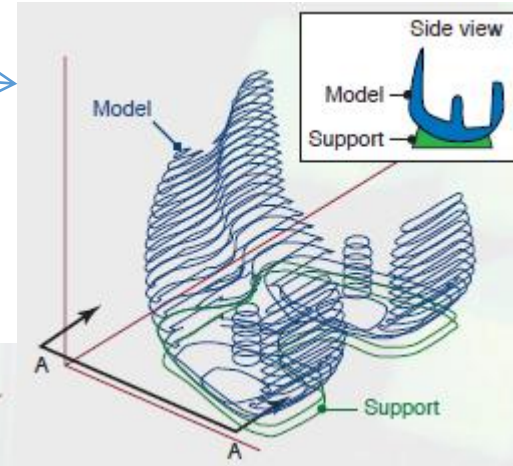
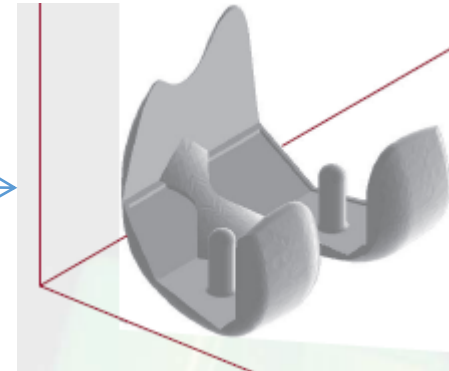
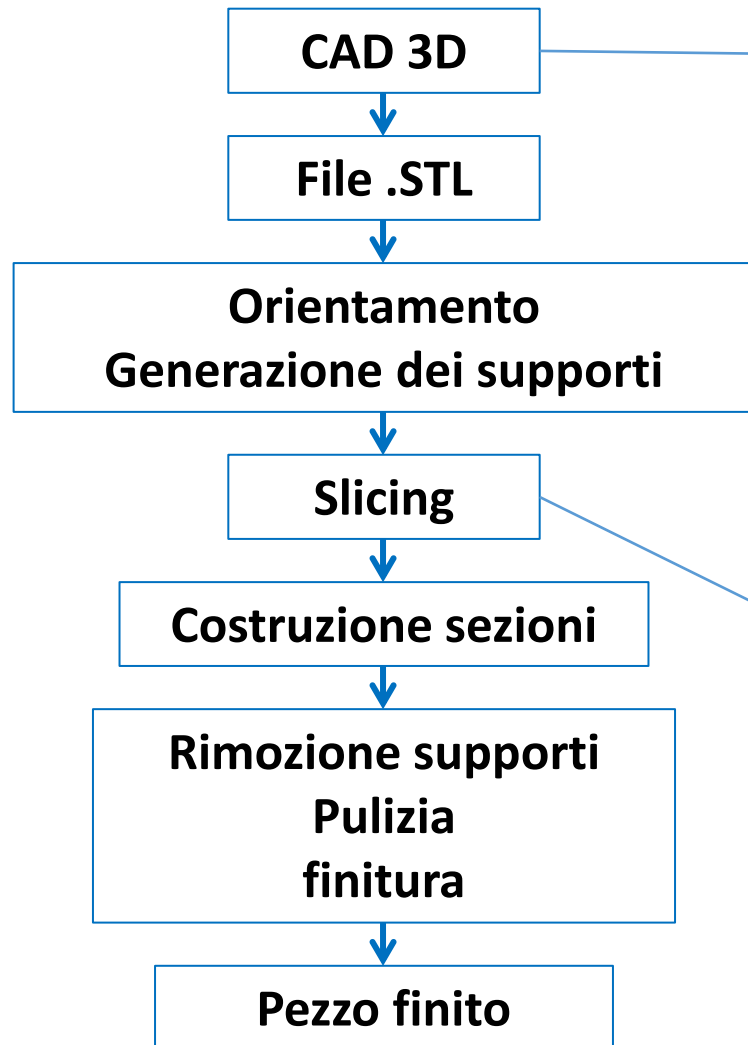
Si basa sul concetto che ogni oggetto può essere visto come costituito da tante sezioni di spessore infinitesimo.

Il prototipo viene, così realizzato sezione dopo sezione, trasformando il problema da tridimensionale in bidimensionale.

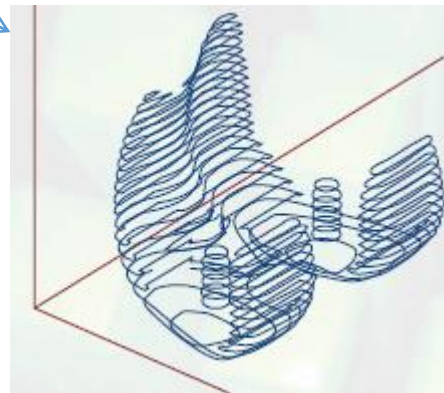
Gli oggetti sono ottenuti con progressiva aggiunta di materia. Per questo motivo la tecnologia RP è anche definita tecnica di produzione per strati o per piani (layer manufacturing) → **tecnica additiva**

NB: per esempio la fresatura è una tecnica sottrattiva

10. Rapid prototyping/Stampa 3D



sez. AA



10. Rapid prototyping/Stampa 3D

Stereolithography (SLA)

Fotopolimerizzazione di resina liquida con UV //
fotopolimeri

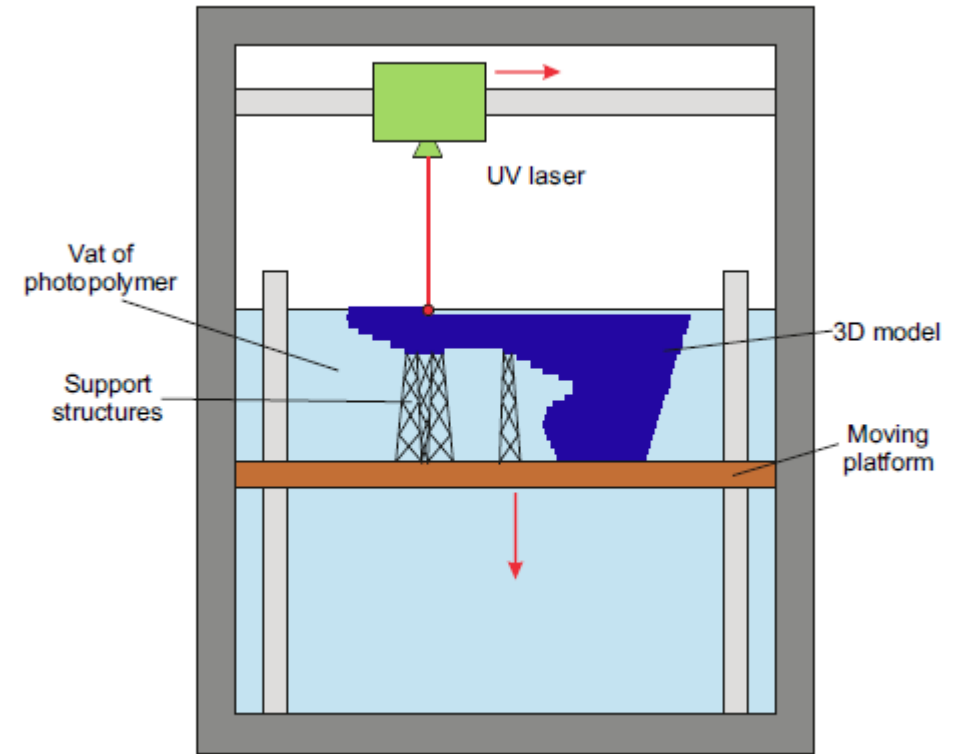


FIG. 4.77 Stereolithography.

10. Rapid prototyping/Stampa 3D

Selective Laser Sintering (SLS)

Fusione o sinterizzazione di polveri via laser CO_2 / la polvere fa da sostegno // termoplastici, metalli (non solo bassofondenti), sabbie.

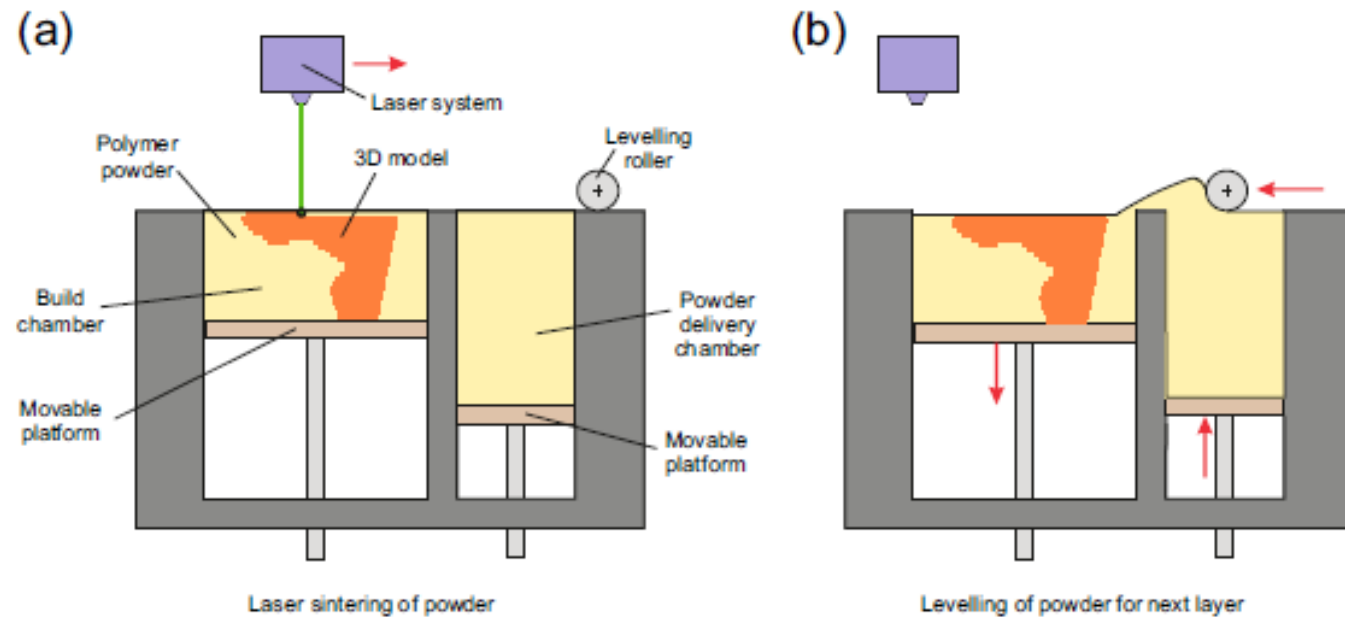


FIG. 4.79 Selective laser sintering.

10. Rapid prototyping/Stampa 3D

Fused filament fabrication (FFF)

Fili di termoplastico estruso e depositato in strati sottili attraverso una testina mobile; solidificazione rapida // termoplastici, cere.

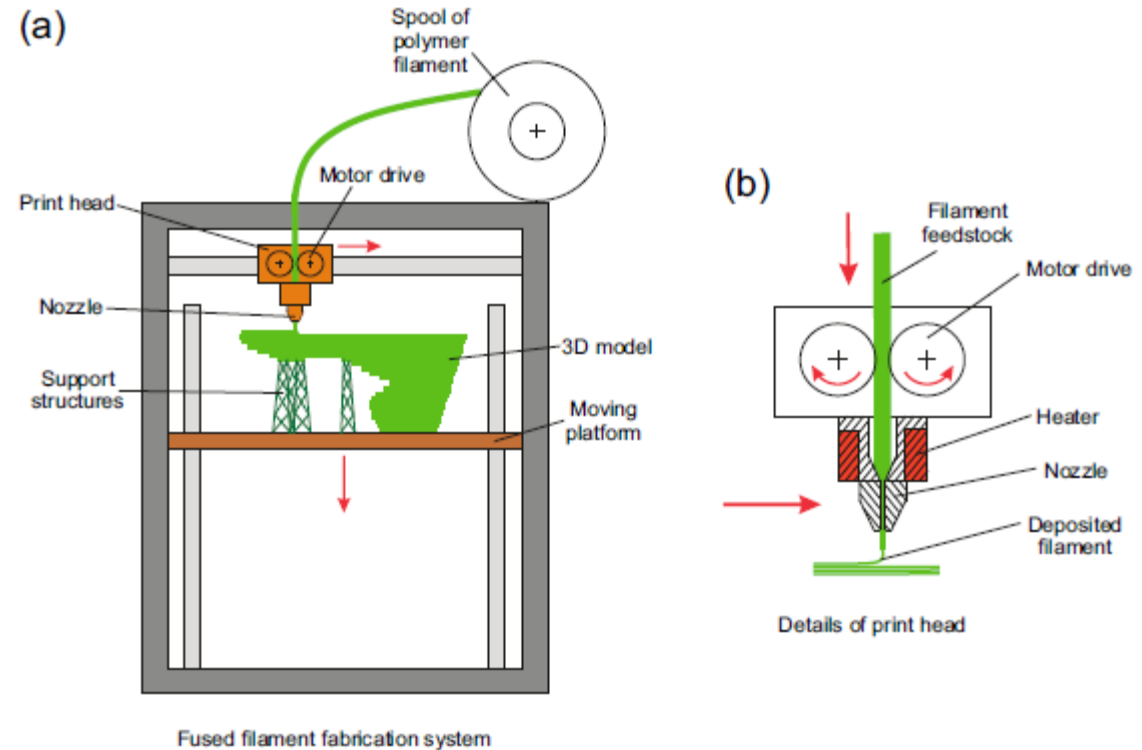


FIG. 4.78 Fused filament fabrication.

10. Rapid prototyping/Stampa 3D

Applicazioni:

- Modelli e prototipi
- Componenti di geometria complessa
- Componenti personalizzati



10. Rapid prototyping/Stampa 3D

Vantaggi:

- Utilizzo minimo di materiale
- **Personalizzazione dei pezzi**
- Rapidità
- Economicità
- **Fabbricazione di geometrie complesse**

Svantaggi:

- Processo:
 - Sporgenze
 - **Vuoti**
 - Spessori
 - Warping
 - Livello di dettaglio
- Tecnologia:
 - Materiali a disposizione
 - Volume stampante
 - Proprietà/Qualità
 - Quantitativi
 - Normative