

POLITECNICO
DI TORINO

SISTEMI DI PRODUZIONE

Dario Antonelli – Lezione B4

Introduzione alla lezione

- Proprietà dei polimeri
- Descrizione dei principali tipi di polimeri
- Principali processi produttivi

Moduli del corso

A: I materiali

B: Formatura

C: Deformazione

D: Taglio e Controllo Numerico

E: Altri Processi

Lezioni del Modulo B

La produzione industriale

Il processo di fusione

La fusione in forma transitoria

La fusione in forma permanente

La formatura dei polimeri

I polimeri

Polimeri

6

Il primo polimero sintetico fu la fenol-formaldeide, un termoindurente sviluppato nel 1906 e chiamato Bakelite.



Proprietà dei polimeri

7

I polimeri sono caratterizzati da:

- bassi valori di densità;
- Bassa resistenza;
- Bassa rigidità;
- bassa conducibilità elettrica;
- elevata resistenza agli agenti chimici;
- elevata versatilità d'impiego;
- facilità di lavorazione.

Monomero

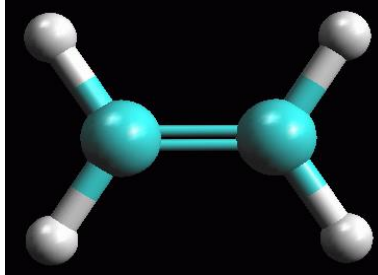
8

- Il **monomero** costituisce l'elemento costruttivo di base dei polimeri;
- La maggior parte dei monomeri sono materiali organici nei quali gli atomi di carbonio sono legati con altri atomi quali idrogeno, ossigeno, azoto... attraverso legami covalenti.

Etilene

9

- Un esempio di monomero è l'etilene (C_2H_4).



Polimerizzazione

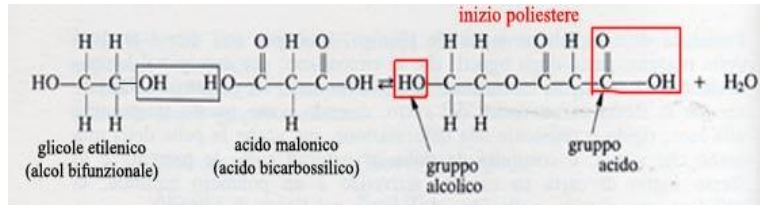
10

I processi di polimerizzazione sono molto complessi, i due processi fondamentali sono:

- Polimerizzazione per condensazione
- Polimerizzazione per addizione

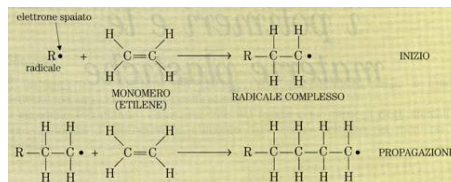
Polimerizzazione per condensazione

- I polimeri vengono ottenuti attraverso la formazione di legami tra due tipi di monomeri reagenti. Si ha la condensazione di acqua come sottoprodotto della reazione.



Polimerizzazione per addizione

- I legami hanno luogo senza sottoprodotti di reazione. Perché la reazione avvenga, è necessario introdurre un iniziatore per aprire il doppio legame tra gli atomi di carbonio.
- I monomeri di etilene si legano mediante una polimerizzazione per addizione per formare il polietilene.

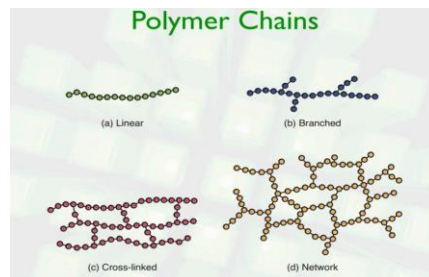


Catene polimeriche

- Nel corso della polimerizzazione, i monomeri vengono uniti attraverso un legame covalente formando così una catena polimerica.



- Le catene polimeriche



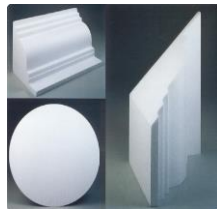
I Materiali

Si possono distinguere tre categorie di polimeri:

- materiali termoplastici;
- materiali termoindurenti;
- elastomeri.

Materiali termoplastici

- Per essere portati allo stato di plastificazione e modellati, richiedono calore.
- Il polimero ritorna alla sua originale durezza se viene raffreddato; gli effetti del processo sono reversibili.
- Cicli ripetuti di riscaldamento e raffreddamento dei termoplastici possono causarne la degradazione (invecchiamento termico).
- Un esempio di polimero termoplastico è il polistirene:



Materiali termoindurenti

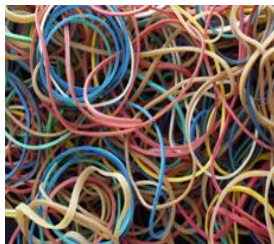
Quando le lunghe catene di un polimero vengono reticolate nelle tre dimensioni, la struttura diventa un'unica molecola gigante con forti legami covalenti. Questi polimeri prendono il nome di polimeri termoindurenti. Questa reazione di reticolazione o cross-linking, al contrario di quella dei termoplastici, è irreversibile. Dopo essere stati cotti e raffreddati, un successivo riscaldamento non modifica la forma.



Elastomeri

Gli **elastomeri** sono polimeri in grado di recuperare le dimensioni e la forma originaria dopo che un carico, ad esso applicato, è stato rimosso.

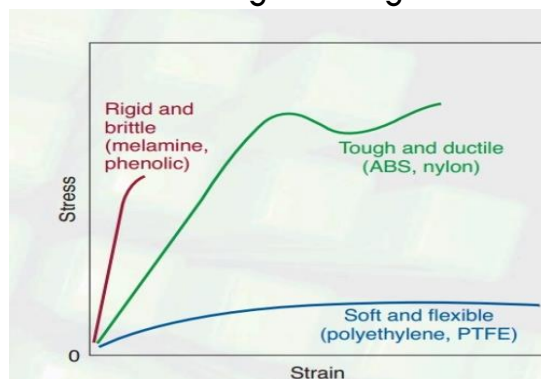
Lo zolfo crea un legame di saldatura forte fra le macromolecole della gomma naturale



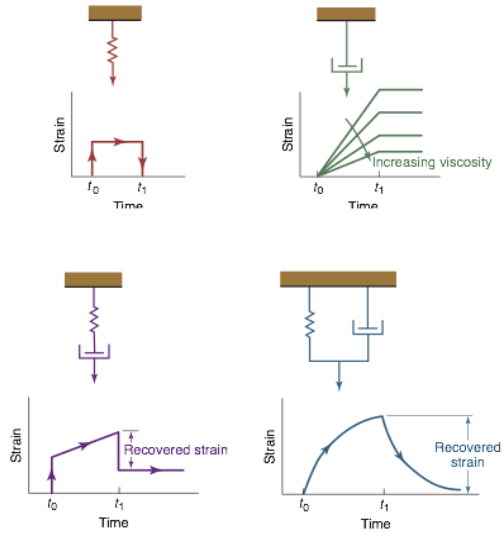
Tensioni-deformazioni dei polimeri

18

- I diagrammi tensione-deformazione di alcuni materiali termoplastici e termoindurenti sono rappresentati nella seguente figura:

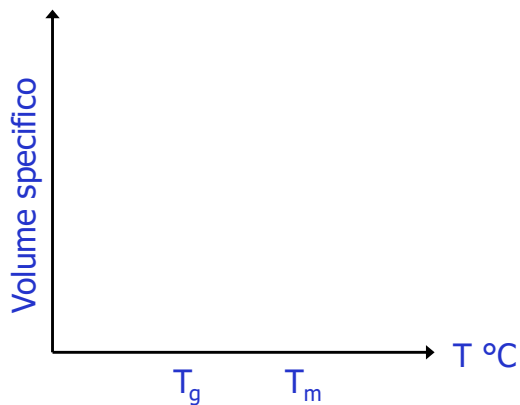


Modi di deformazione



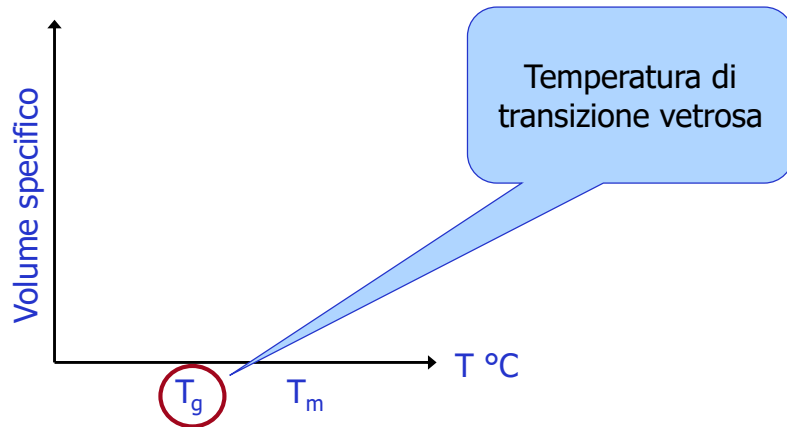
Il processo di solidificazione

20



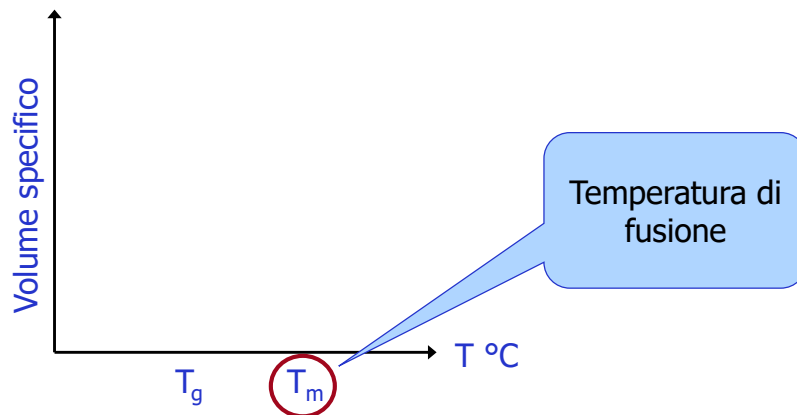
Il processo di solidificazione

21



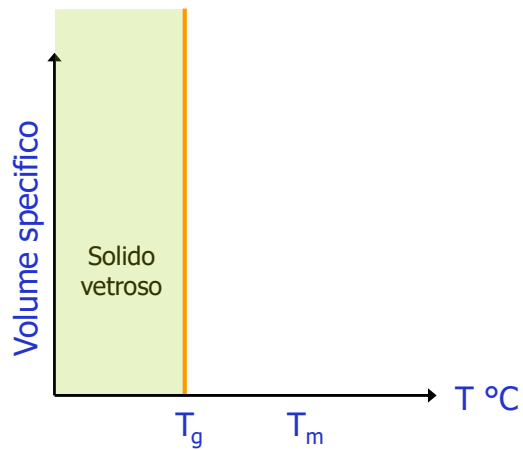
Il processo di solidificazione

22



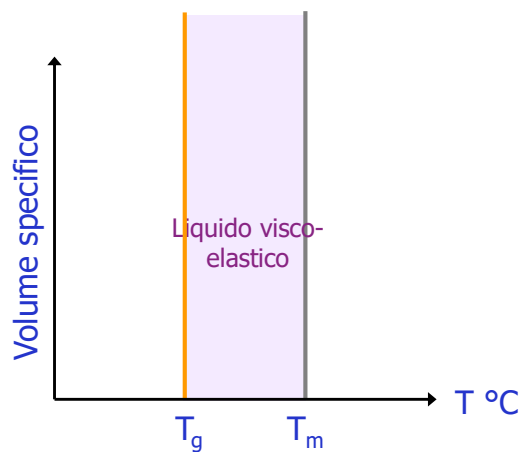
Il processo di solidificazione

23



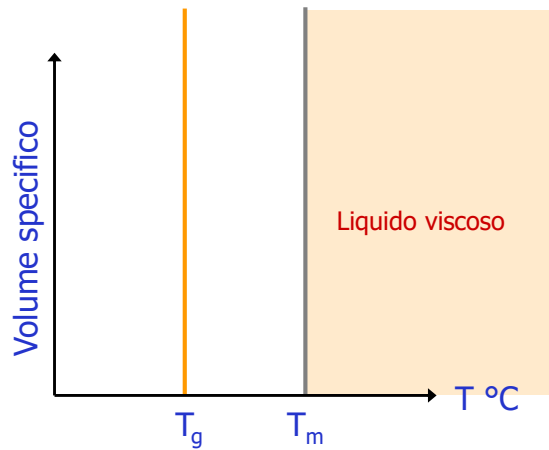
Il processo di solidificazione

24



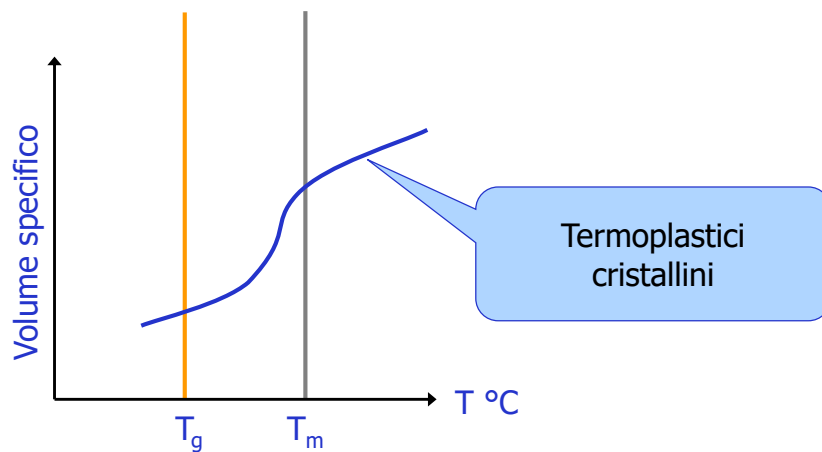
Il processo di solidificazione

25



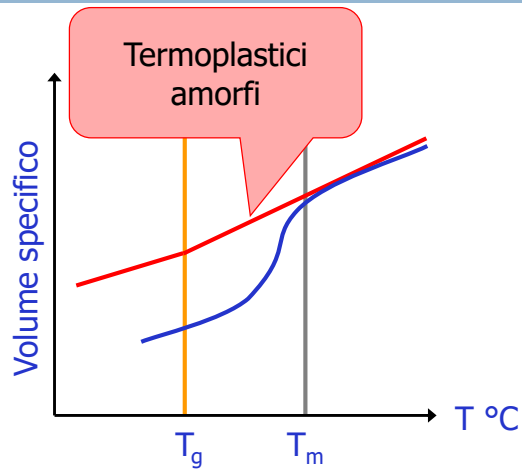
Il processo di solidificazione

26



Il processo di solidificazione

27



Requisiti per un materiale polimerico

28

□ Un **polimero termoplastico amorfo**

□ $T_g < T_{\text{esercizio}}$

Requisiti per un materiale polimerico

29

- Un polimero termoplastico amorfo

- $T_g < T_{\text{esercizio}}$

- Un polimero termoindurente

- $T_{\text{esercizio}} < T_g$ rigidezza

- $T_{\text{esercizio}} > T_g$ deformabilità

Caratteristiche fisico – chimiche

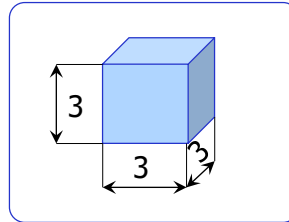
30

- Bassa densità ($< 1 \text{ Kg/dm}^3$)
- Resistenza a trazione su valori ($R_M < 70 \text{ MPa}$)
- Resistenza all'urto ($21 \div 750 \text{ J/m}$)
- Capacità di isolamento elettrico ($15 \div 70 \text{ V/m}$)
- Bassa T massima ($50 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$) eccetto il teflon (290°C)

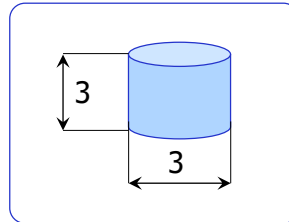
Modalità di fornitura: pellets

31

□ Granuli cubici



□ Grauli cilindrici



Additivi utilizzati

32

□ Cariche inerti

- usate su termoindurenti o su cloruro di polivinile
- migliore comportamento allo stampaggio
- migliori caratteristiche meccaniche e dimensionali

Additivi utilizzati

33

- Cariche inerti
- **Agenti rinforzanti**
 - ▣ vetroresine utilizzate su laminati plastici o termoplastici (ABS, nylon, polistirolo)
 - ▣ migliori caratteristiche meccaniche dei manufatti

Additivi utilizzati

34

- Cariche inerti
- Agenti rinforzanti
- **Plastificanti** (su polimeri termoplastici)
 - ▣ liquidi ad alto punto di ebollizione
 - ▣ solidi a punto di fusione basso
 - ▣ polimeri a massa molecolare non elevata (poliesteri)

Additivi utilizzati

35

- Cariche inerti
- Agenti rinforzanti
- Plastificanti
- Pigmenti e coloranti
- Lubrificanti, indurenti, stabilizzanti, inibenti, ecc...

Lavorazione dei termoplastici

36

- Raffreddando il materiale al di sotto delle temperature:
 - T_m (fusione) il polimero è cristallino
 - T_p (rammollimento) il polimero è amorfo

Lavorazione dei termoindurenti

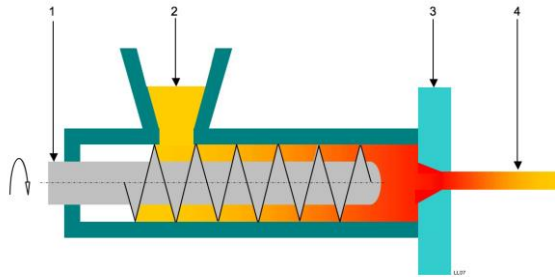
37

- Riscaldamento fino alla temperatura di reticolazione
- Formatura del polimero
- Mantenimento del polimero alla temperatura di reticolazione fino a fine processo

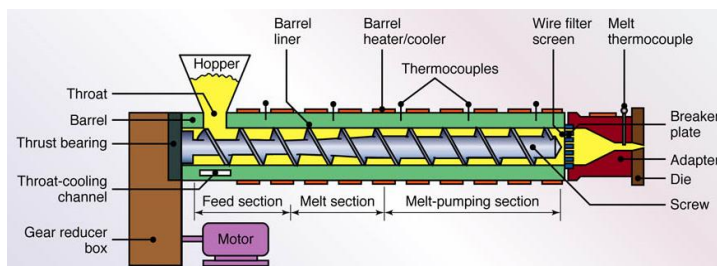
I processi di lavorazione

Processo	Caratteristiche
Estrusione	Pezzi lunghi, uniformi, pieni o cavi, con sezioni di forma semplice o complessa; ampia gamma di tolleranze dimensionali; elevati volumi produttivi; basso costo delle attrezzature
Stampaggio a iniezione	Forme complesse di diverse dimensioni e con elevato grado di dettaglio; buona accuratezza dimensionale; elevati volumi produttivi; elevato costo delle attrezzature
Termoformatura	Cavità di diversa profondità; volumi produttivi medi; basso costo delle attrezzature

Estrusione



Estrusione



Pellets sono versati nella tramoggia e introdotti nel cilindro dell'estrusore.

- ✓ La vite provvede a miscelare e trasportare i granuli lungo il cilindro
- ✓ Tensioni di taglio, attrito interno e termoresistenze scaldano i granuli e li portano a fusione
- ✓ L'azione della vite aumenta la pressione nel cilindro
- ✓ Le lunghezze di queste sezioni possono esser modificate per adeguarsi alle caratteristiche di fusione specifiche del materiale

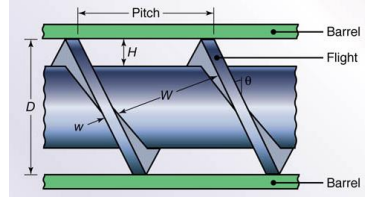
Meccanica dell'estrusione dei polimeri

$$Q_d = \frac{v \cdot H \cdot W}{2}$$

$$v = \omega \cdot \frac{D}{2} \cos \theta = \pi \cdot D \cdot n \cdot \cos \theta$$

$$W = \pi \cdot D \cdot \sin \theta - w \approx \pi \cdot D \cdot \sin \theta$$

$$Q_d = \frac{\pi^2 \cdot H \cdot D^2 \cdot N \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta}{2}$$



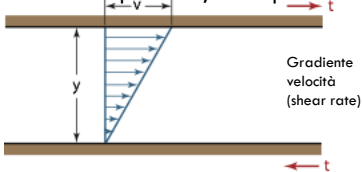
Per fluidi newtoniani la portata dell'estrusore (caratteristica dell'estrusore) diventa:

$$Q_d = \frac{\pi^2 \cdot H \cdot D^2 \cdot N \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta}{2} \cdot \frac{p \cdot \pi \cdot D \cdot H^3 \cdot \sin^2 \theta}{12 \cdot \eta \cdot l}$$

$$\eta = A \cdot \dot{\gamma}^{1-n} \quad \begin{matrix} A: \text{indice di consistenza} \\ n: \text{indice della legge di potenza} \end{matrix} \quad \tau = A \cdot \dot{\gamma}^n$$

Meccanica dell'estrusione

La viscosità è una misura della resistenza delle molecole a scorrere una sull'altra e dipende dalla temperatura, dalla pressione e dal peso molecolare del polimero

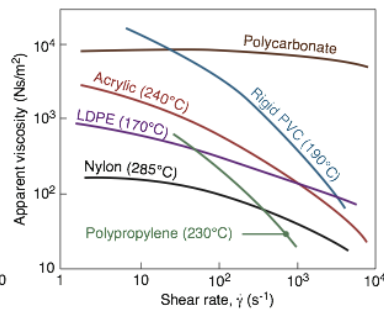
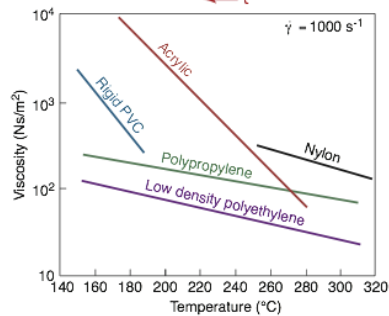


newtoniano

$$\tau = \eta \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right) = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Pseudoplastico (PVC)

$$\eta = A \cdot \dot{\gamma}^{1-n}$$



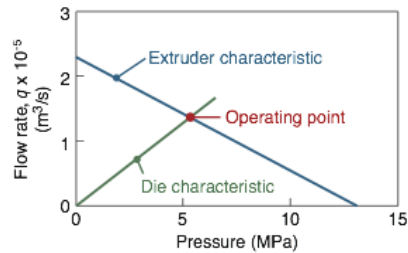
Meccanica dell'estrusione dei polimeri

- ✓ La matrice ha un ruolo fondamentale nella resa dell'estrusore. La sua caratteristica mette in relazione la portata (Q_{die}) con la caduta di pressione p attraverso la matrice, secondo l'equazione:

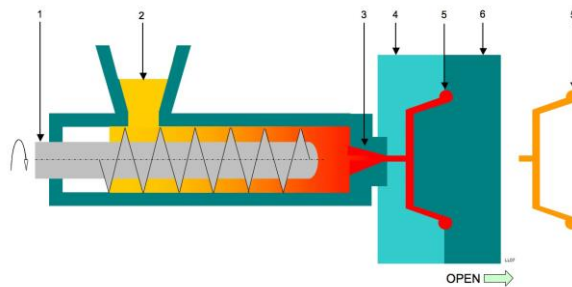
$$Q_{die} = K \cdot p \quad \begin{array}{l} K \text{ è in genere determinato sperimentalmente} \\ \text{Per una sezione circolare chiusa, } K \text{ è:} \end{array} \quad K = \frac{\pi \cdot D_{die}^4}{128 \cdot \eta \cdot l_{die}}$$

- ✓ Le caratteristiche dell'estrusore e della matrice, permettono di determinare il punto di funzionamento del processo
- ✓ Una volta nota la portata di estrusione e il punto di intersezione delle due caratteristiche, è possibile determinare la velocità del materiale che lascia l'estrusore. Ignorando il rigonfiamento, questa è:

$$v_{estruso} = \frac{Q}{A_{estruso}}$$

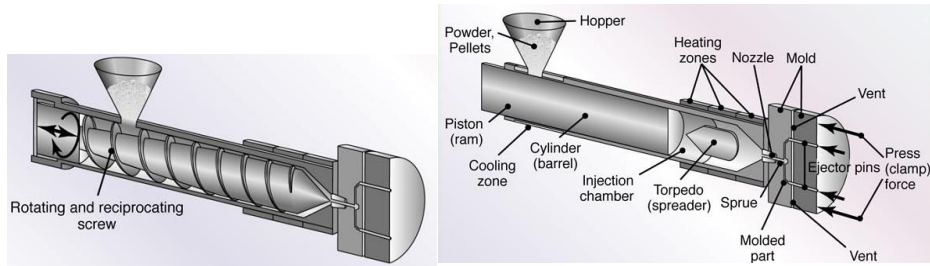


Stampaggio ad iniezione

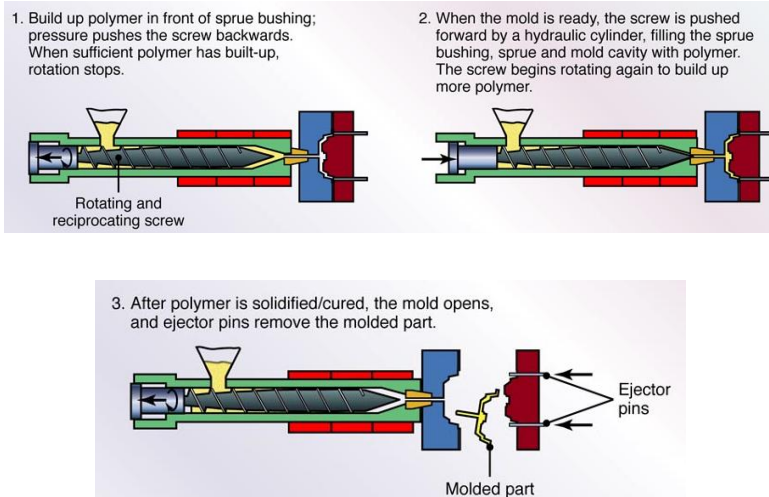


Stampaggio a iniezione

- Il processo può essere applicato ai termoplastici e ai termoindurenti
- Lo stampaggio a iniezione (*injection moulding*) è molto simile al processo di colata in camera calda
- I pellet sono introdotti in un cilindro riscaldato e portati a fusione
- Il fuso è forzato a fluire all'interno di uno stampo, che è diviso in due metà, grazie all'azione di un pistone idraulico o di una vite. La maggior parte delle applicazioni moderne è a vite pistonante (*reciprocating screw*)

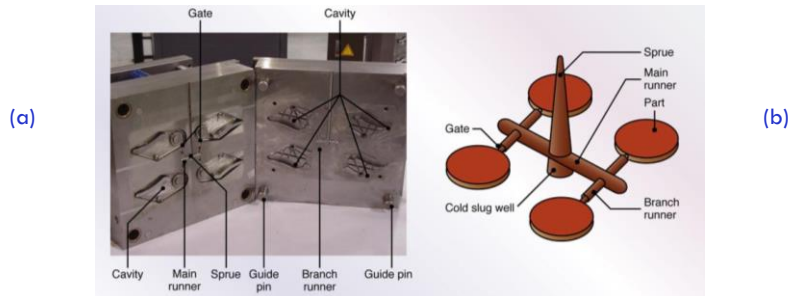


Stampaggio a iniezione



Stampaggio a iniezione

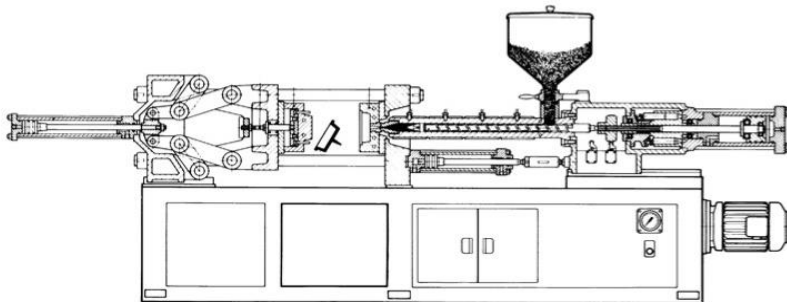
- Il materiale è iniettato allo stato fuso.
- Il ritiro in fase liquida è compensato mantenendo il materiale in pressione sino al momento della solidificazione del gate.
- Il ritiro in fase solida deve essere compensato sovradimensionando la cavità dello stampo



- (a) Two-plate mold with important features identified.
 (b) Four parts showing details and the volume of material involved.

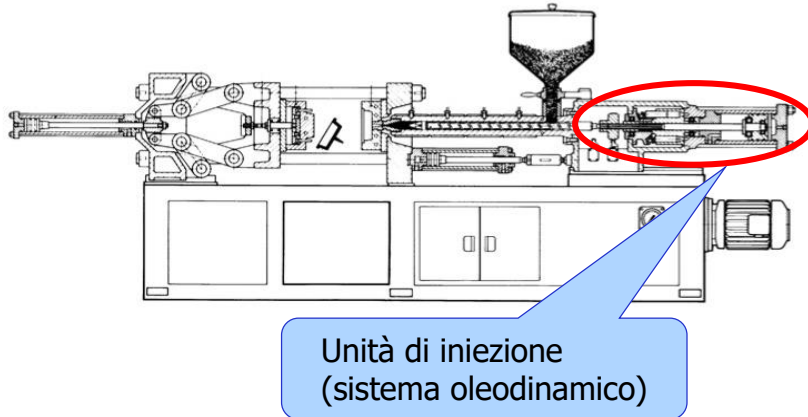
Pressa per stampaggio ad iniezione

48



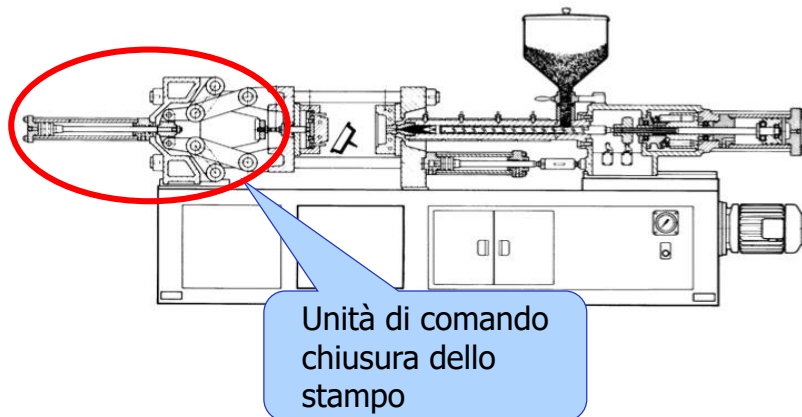
Pressa per stampaggio ad iniezione

49



Pressa per stampaggio ad iniezione

50



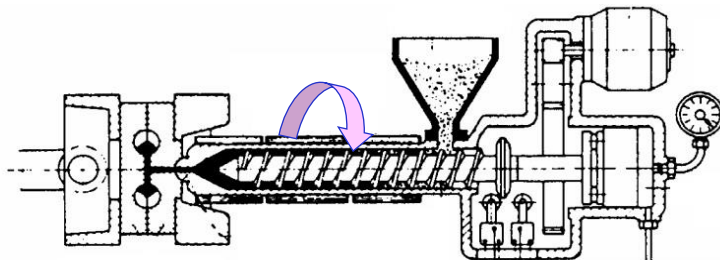
Pressa per stampaggio ad iniezione

53



Sistema di pressione a vite

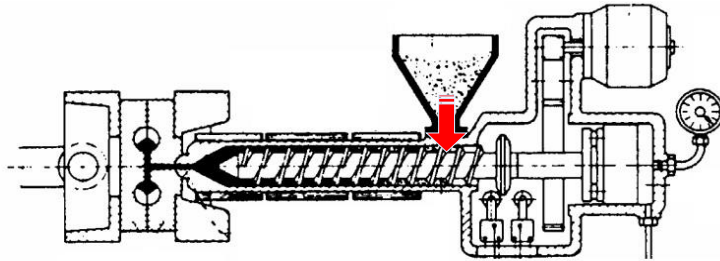
54



Analisi del processo

55

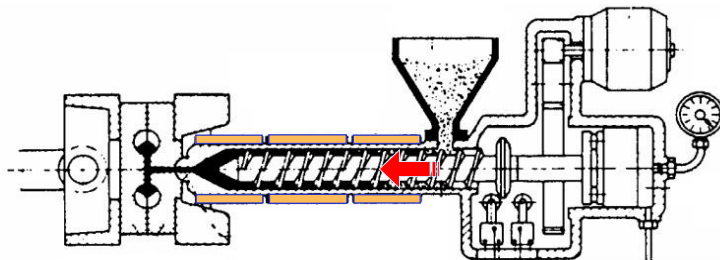
- Ingresso del materiale granulato dalla tramoggia alla vite



Analisi del processo

56

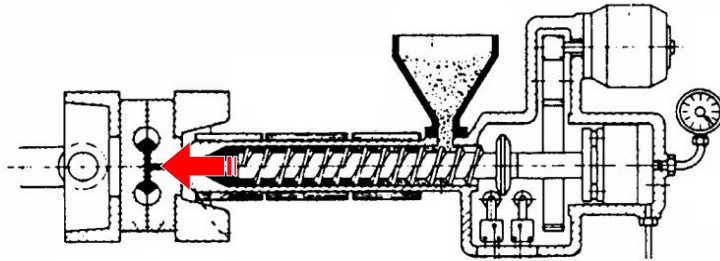
- Fluidificazione del polimero nel passaggio attraverso piastre di riscaldamento



Analisi del processo

57

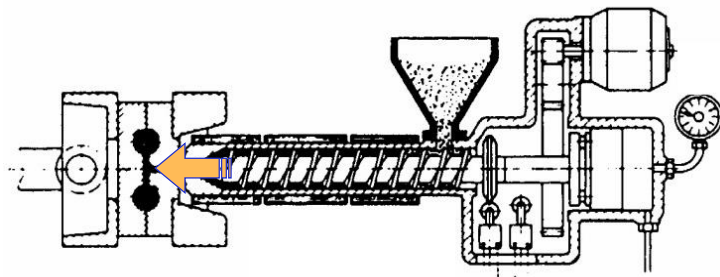
- Riempimento parziale dello stampo attraverso un ugello di iniezione



Analisi del processo

58

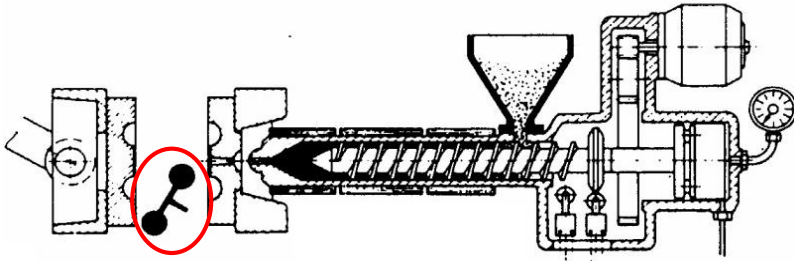
- L'azione della vite mantiene in pressione il materiale nello stampo fino alla solidificazione



Analisi del processo

59

- Estrazione del polimero dallo stampo



Termoformatura



Processo di termoformatura

61

- Riscaldamento dei semilavorati per calandratura fino allo stato plastico del materiale
- Fissaggio perimetrale allo stampo
- Adesione alla superficie interna dello stampo

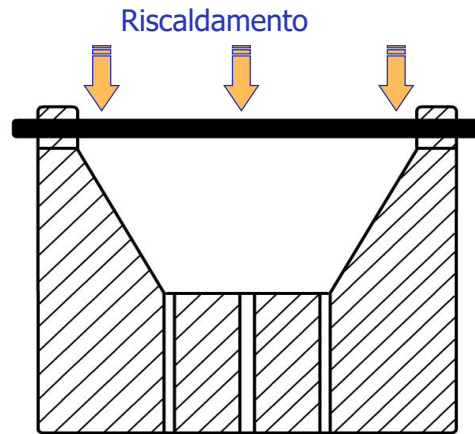
Modalità di termoformatura

62

- Sotto vuoto
- In pressione
- Tra stampi accoppiati

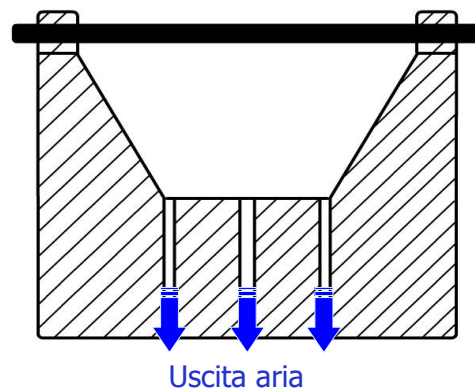
Termoformatura sotto vuoto pneumatico

63



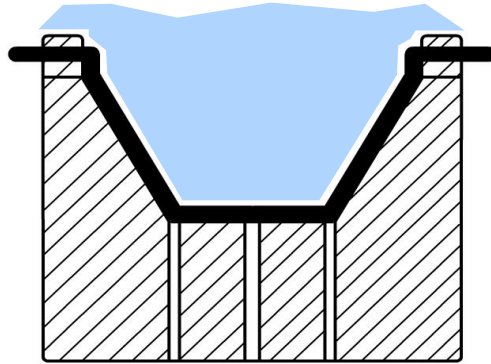
Termoformatura sotto vuoto pneumatico

64



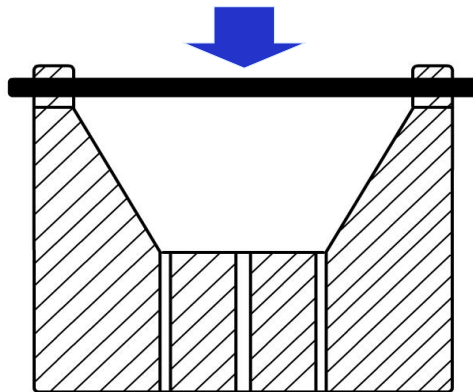
Termoformatura sotto vuoto pneumatico

65



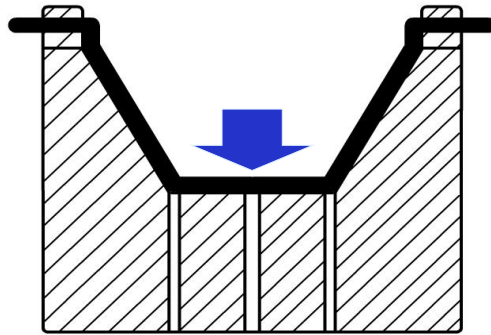
Termoformatura in pressione

66



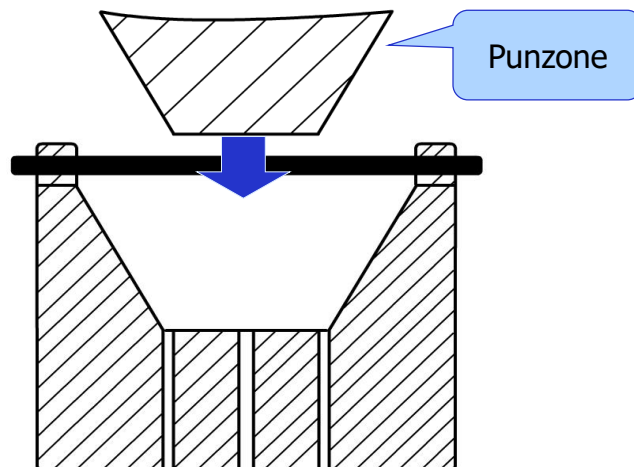
Termoformatura in pressione

67



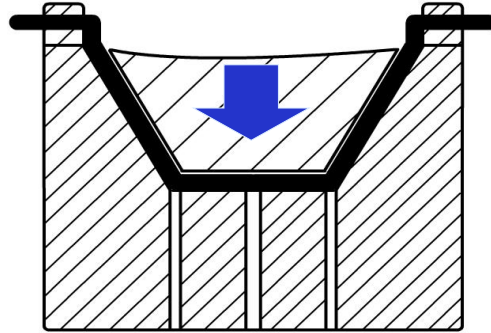
Termoformatura fra stampi accoppiati

68



Termoformatura fra stampi accoppiati

69



Caratteristiche del processo

70

- Dimensioni dei pezzi notevoli (Φ 4000 mm)
- Tempi ciclo elevati
- Materiali usati di poco pregio
- Produzione di oggetti di forma semplice
 - ▣ bicchieri monouso
 - ▣ calotte di aerei
 - ▣ secchi

Conclusioni

- Polimeri lavorati per formatura
- Bassa temperatura di fusione
- Processi continui: estrusione
- Processi discreti: stampaggio in pressa a vite e termoformatura