

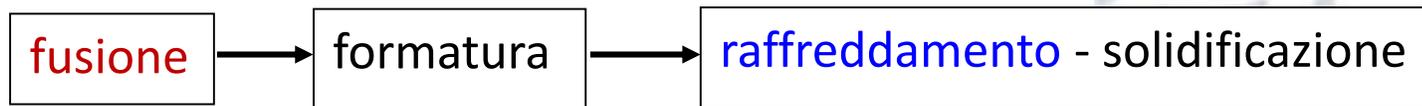
# Materiali Polimerici e Compositi

5 - Formatura

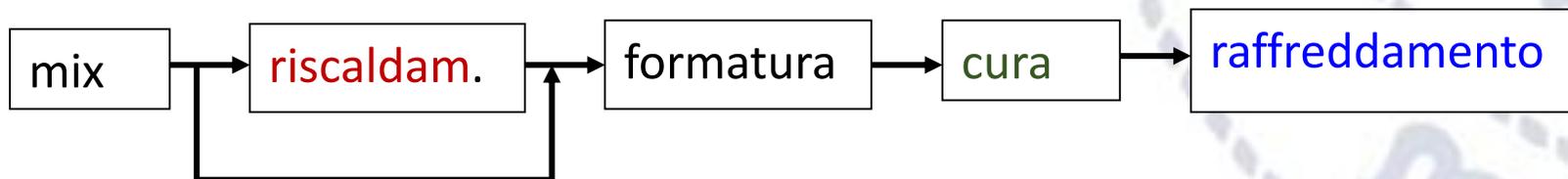
# Introduzione ai processi di formatura

La maggior parte dei processi di formatura segue gli schemi:

Termoplastici



Termoindurenti



Fenomeni connessi:

- **TRASFERIMENTO DI CALORE** (riscaldamento e raffreddamento)
- **TRASFERIMENTO DI MASSA** (del fuso)

# Melt Flow Index (MFI)

Durante la trasformazione di polimeri termoplastici spesso si lavora con polimeri **allo stato fuso**

Si dovrebbe conoscere  $\eta(T, \dot{\gamma})$  ...

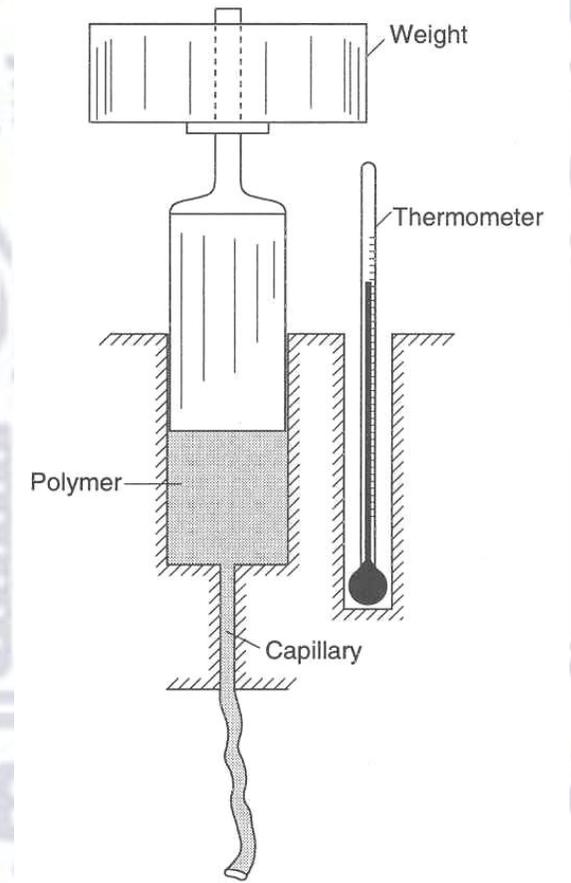
Il parametro industriale per caratterizzare la qualità del fuso è

l'indice di fluidità MFI

Standard ASTM D1238

MFI = peso [g] di polimero che viene estruso  
in 10 min a data T

estrusione  
iniezione



Peso e Dimensioni capillare standardizzati

# Processi

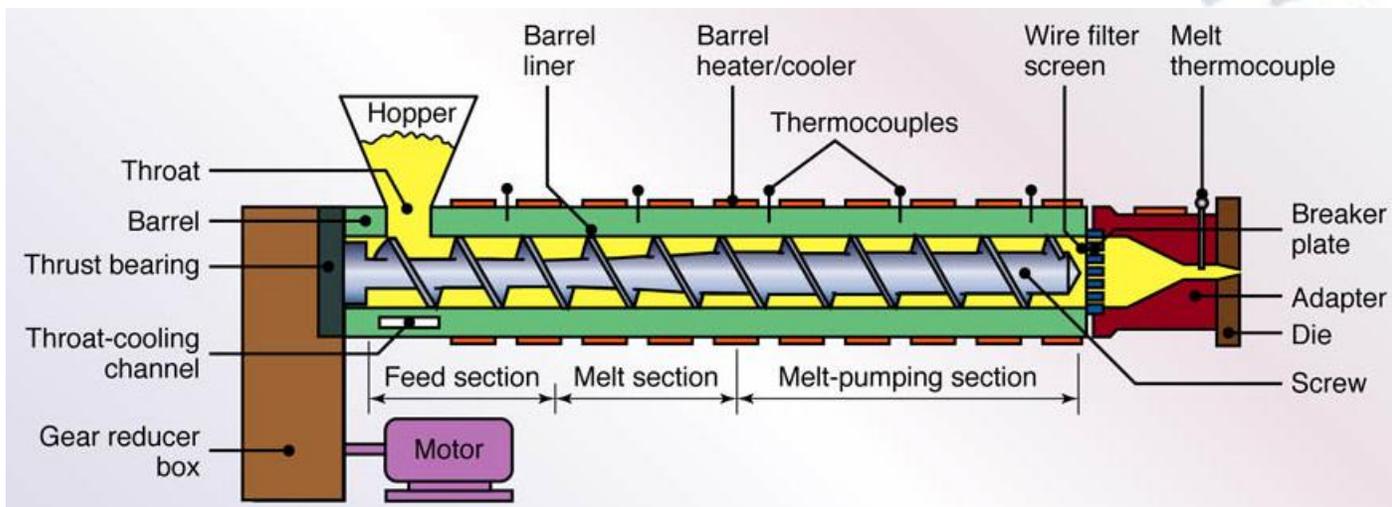
- Estrusione
- Stampaggio x iniezione
- Stampaggio x soffiatura
- Formatura a caldo
- Calandratura
- Stampaggio x rotazione
- Stampaggio per compressione
- Stampaggio per trasferimento
- Rapid prototyping/Stampa 3D



# ESTRUSIONE

Per termoplastici // prepolimeri per termoindurenti

*Vite senza fine in cilindro*



3 zone:

1. Carica
2. Compressione
3. Dosatura

Lunghezza delle 3 zone diversa da polimero a polimero!!!

PA: fusione semplice

⇒ tratto di compressione molto breve

PVC: molto sensibile a T (degrada!!)

⇒ tratto di compressione molto lungo



Carica = Pellet

Le 3 zone hanno geometria di vite differente

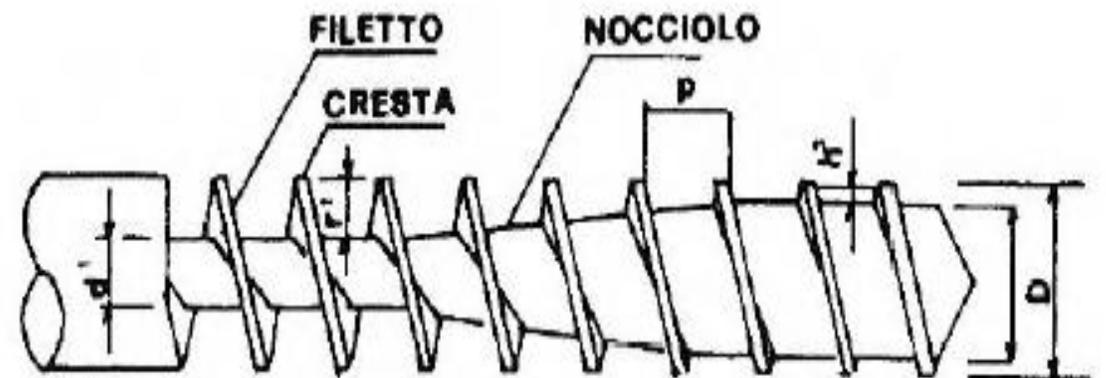
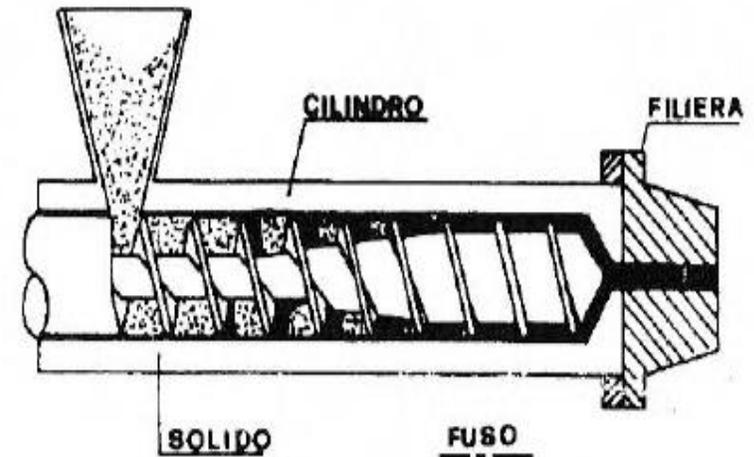
Diametro esterno costante ( $D_e$ ) - *filetto*

diametro interno - *nocciolo* ( $d$ ):

nella zona di *carica* è costante ( $d_{\min}$ )

nella zona di *compressione* è crescente ( $d_{\min} \rightarrow d_{\max}$ )

nella zona di *dosatura* è costante ( $d_{\max}$ )

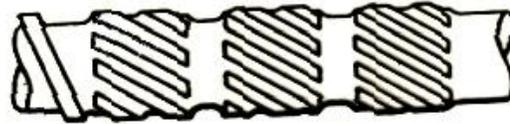


# 1. Carica /alimentazione (feed) ( $d = \text{cost} = d_{\min}$ )

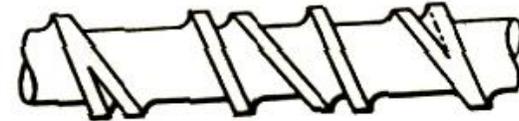
Polimero in polvere o in granuli

Funzione: miscelazione // avanzamento del materiale

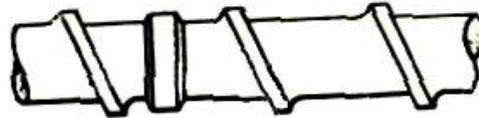
diverse geometrie della vite



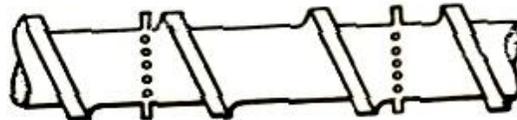
Parallel interrupted mixing flights



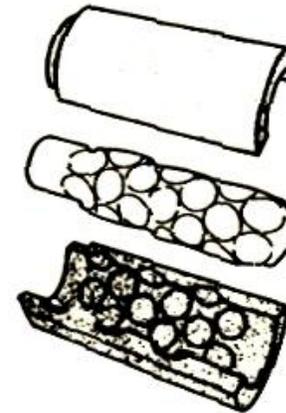
Undercut spiral barrier-type



Ring-type barrier mixer



Mixing pins



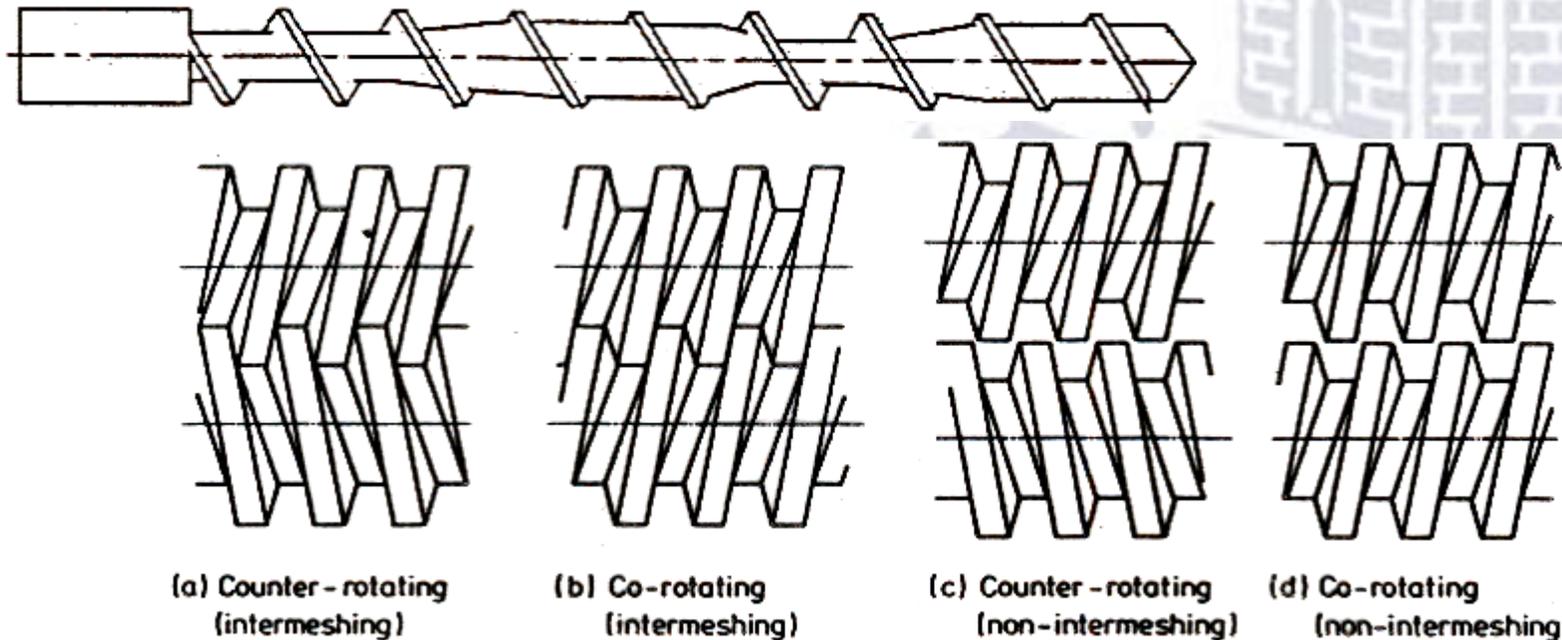
RAPRA cavity transfer mixer

## 2. Compression ( $d_{\min} \rightarrow d_{\max}$ )

Funzione: - compattazione della plastica  
- eliminazione eventuali bolle d'aria  
- fusione per attrito viscoso

diverse geometrie della vite

**fusione:** riscaldatori + attrito

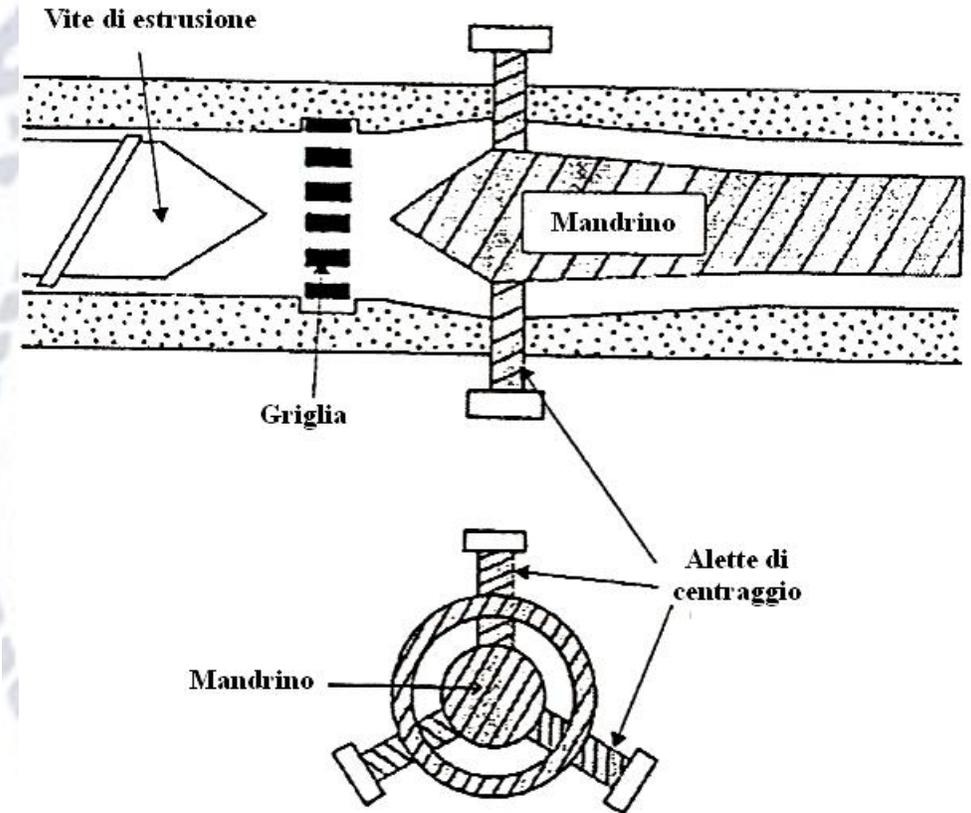
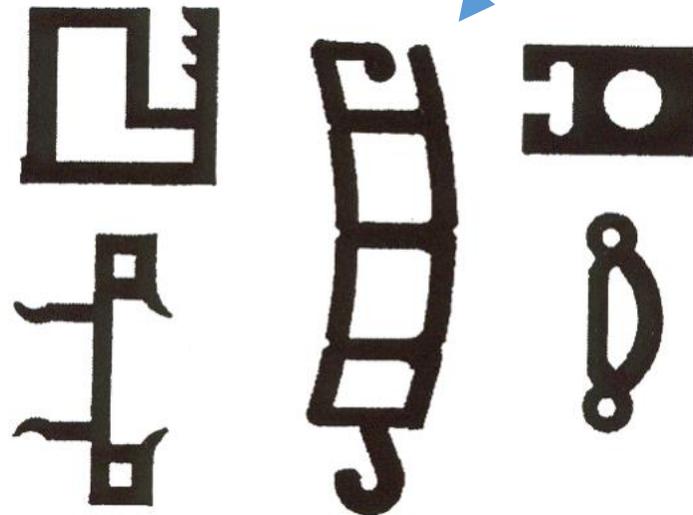


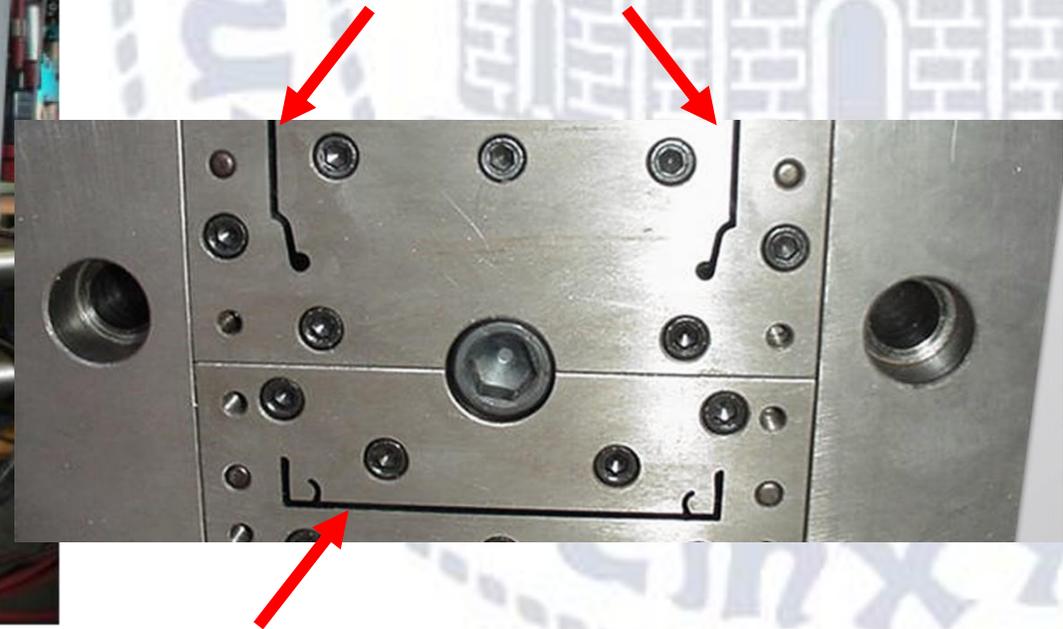
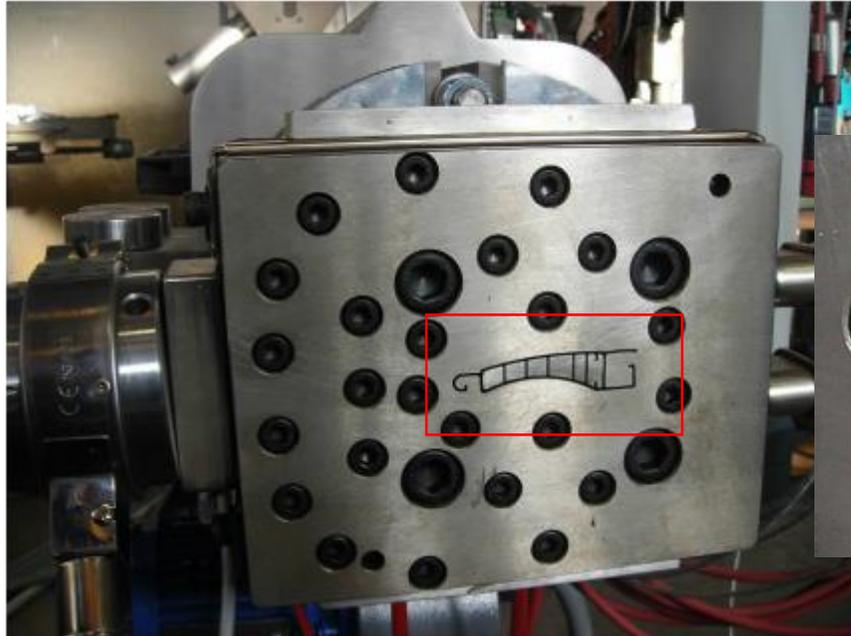
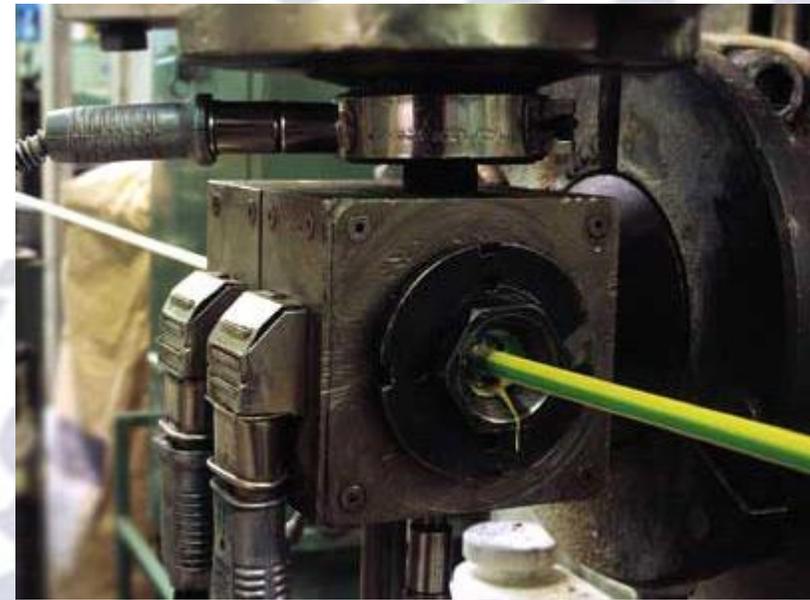
### 3. Dosatura (metering) ( $d = \text{cost} = d_{\text{max}}$ )

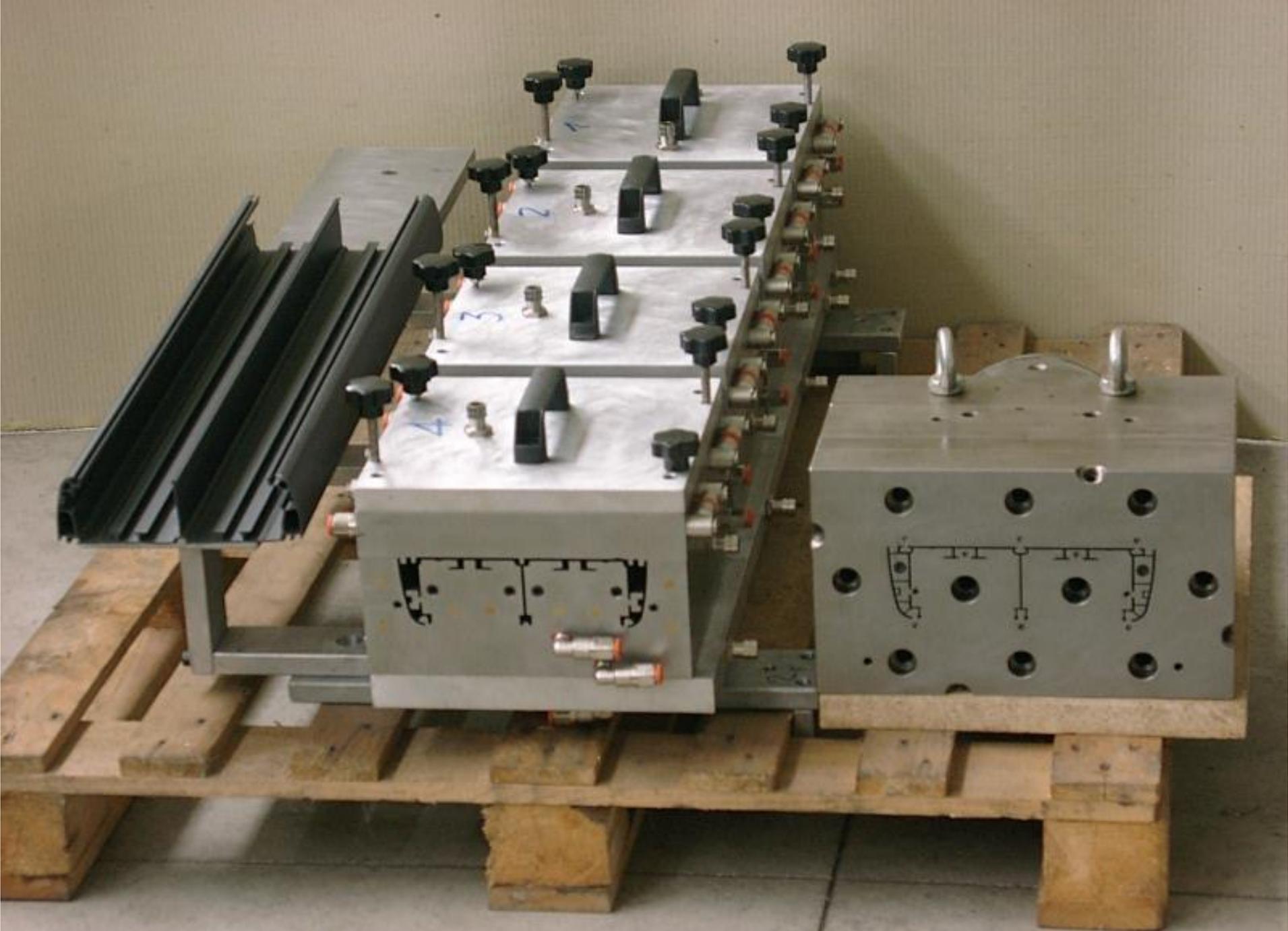
Funzione: - omogeneizzazione del fuso e della sua T  
- **garantire portata costante all'ugello**

Uscita: ugello/filiera (die)

con geometrie varie  
raffreddamento: aria e/o acqua







# Altri elementi

- ✓ Riscaldatori (carica e compressione)
- ✓ Sfiati per eliminare eventuale acqua (polimeri igroscopici)
- ✓ Filtri prima dell'ugello per trattenere corpi estranei o agglomerati (luce ~ 120-150 mm)
- ✓ Raffreddamento esterno presente in alcuni casi per evitare il degrado del polimero

Sono gli stessi «riscaldatori» che fungono da raffreddatori !

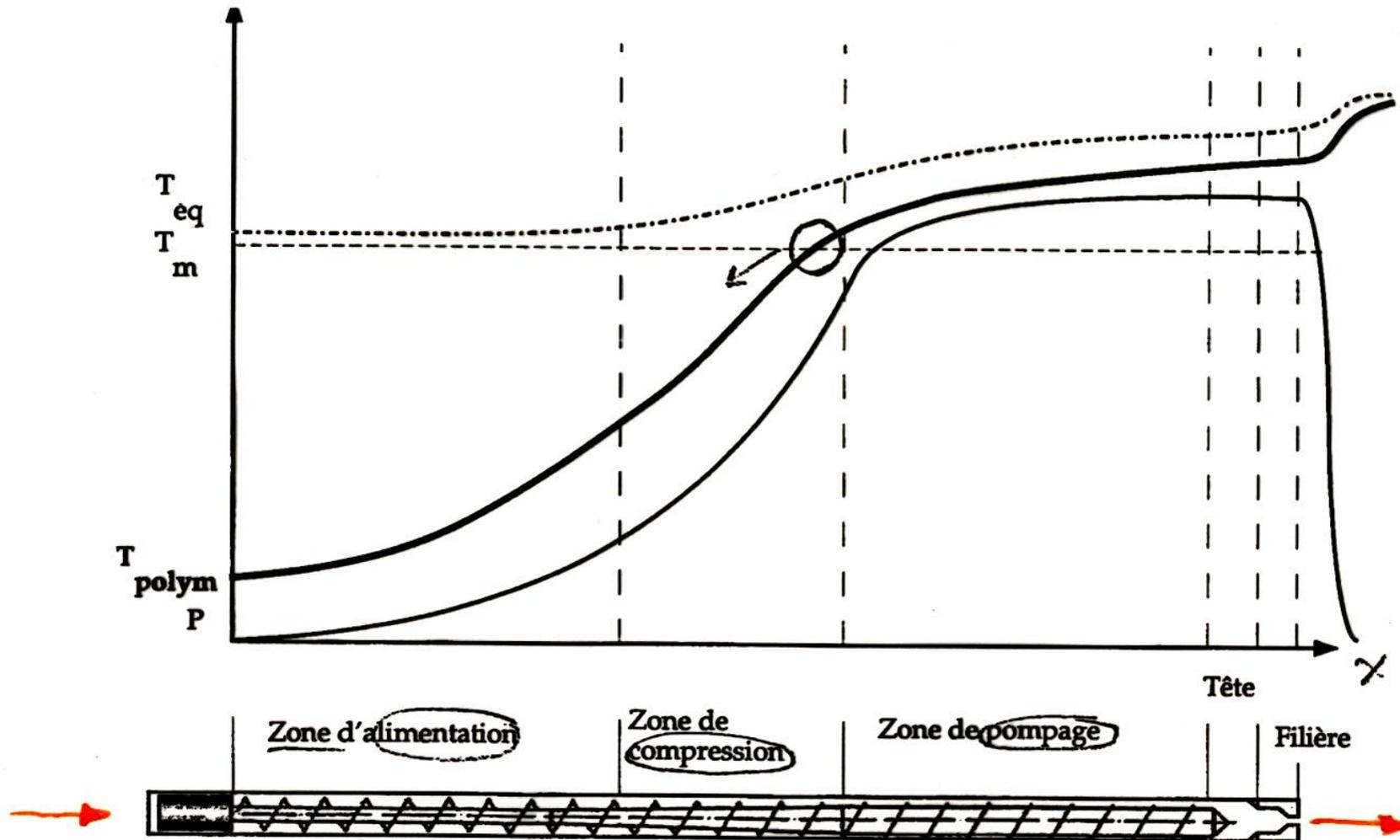
Campi di lavoro tipici:

T ~ 250°C

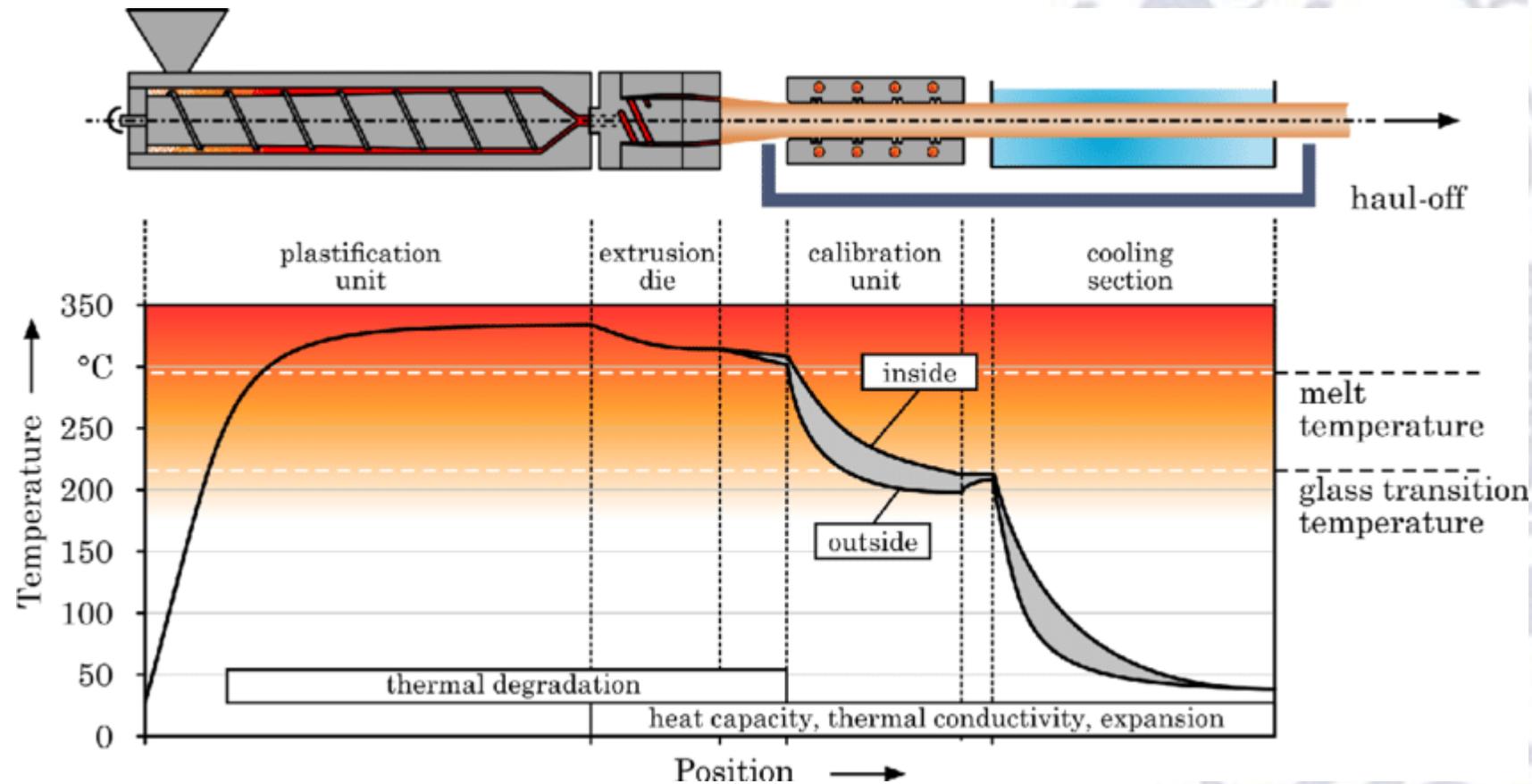
P ~ 40 MPa

velocità vite ~ 50-150 rpm

# Andamento P, T



# Andamento T



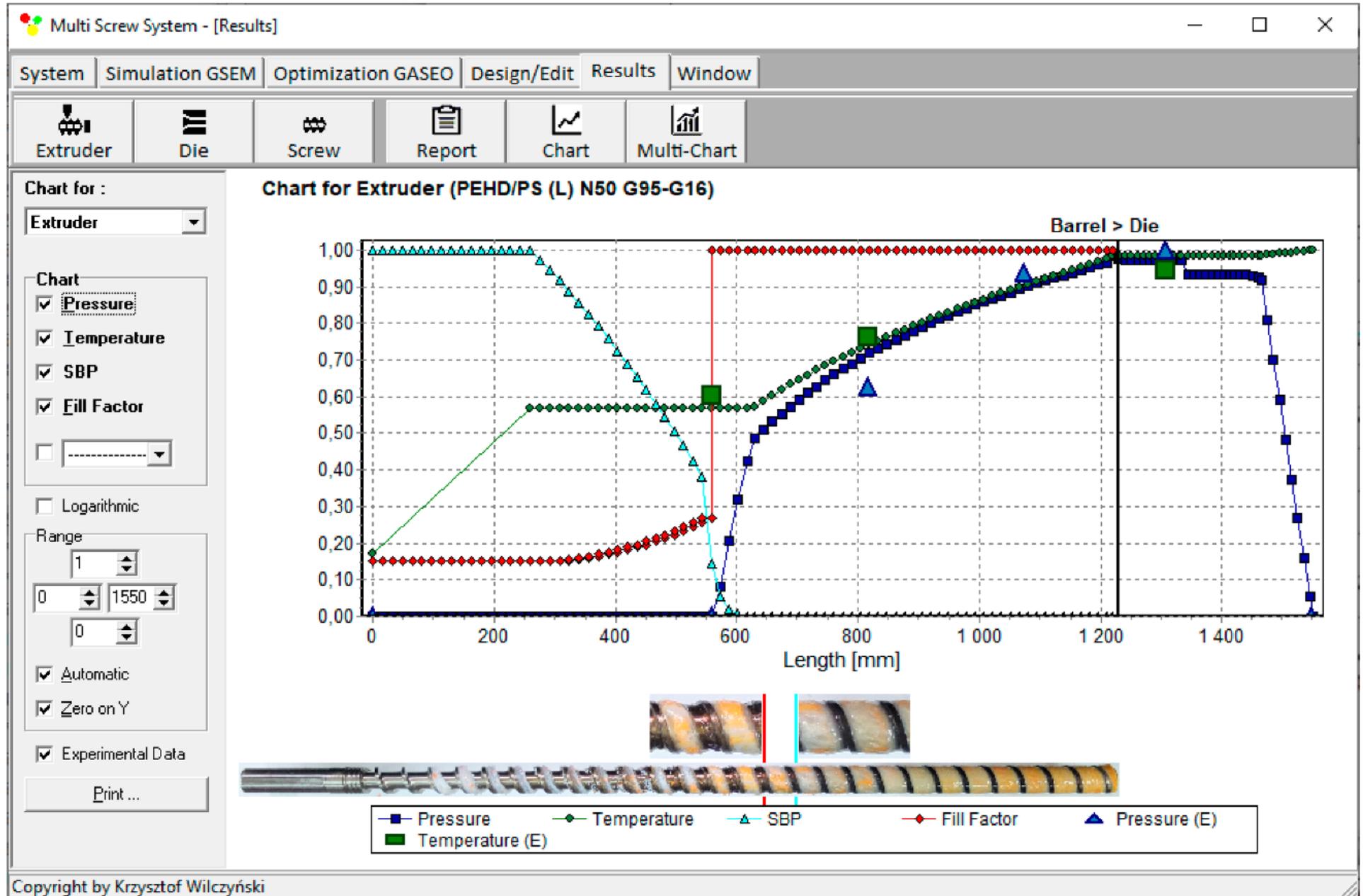
*Esempio per PEI*

*Michael Stegelmann, Michael Müller, Anja Winkler, Alexander Liebsch, Niels Modler, Polymer Analyses for an Adapted Process Design of the Pipe-Extrusion of Polyetherimide; Materials Sciences and Applications, 2018, 9, 614-624*

# Andamento P, T

Confronto tra  
simulazione e realtà

SBP = solid bed profile



# Andamento P, T

Copolimero etilene-vinilalcol (EVOH) *Soarnol*<sup>®</sup>

Dati estrusore/ vite:

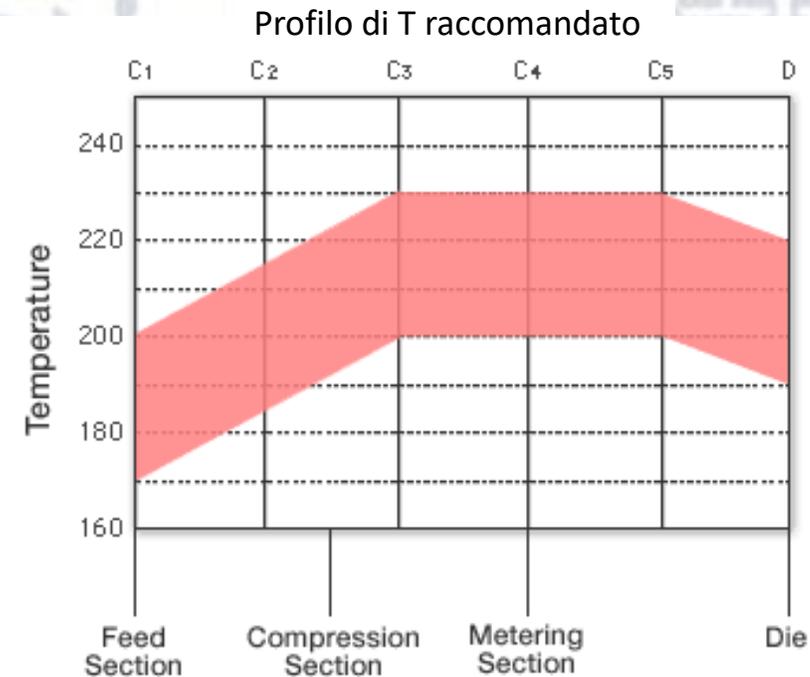
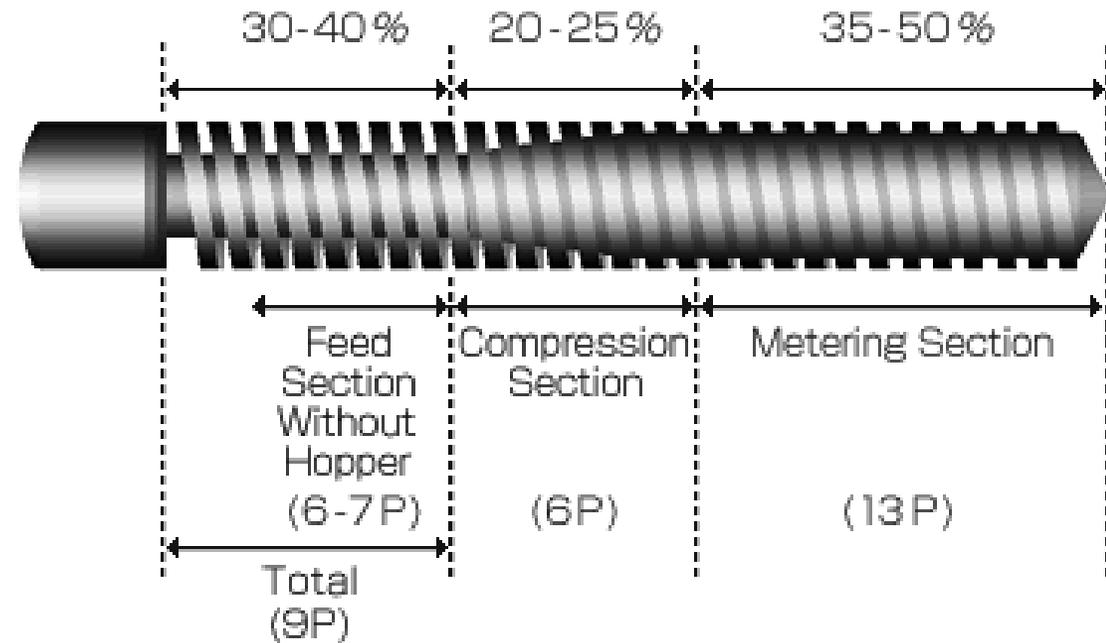
$$L/D = 24 \div 30$$

Rapporto di compressione (CR) = rapporto tra l'altezza del filetto nella zona di alimentazione e l'altezza del filetto nella zona di dosaggio.

Rapporto di compressione (CR) =  $3 \div 3,5$

Placcatura: Cr o Ni-Cr

Si vuole che l'attrito tra vite e fuso sia minore dell'attrito tra fuso e cilindro!

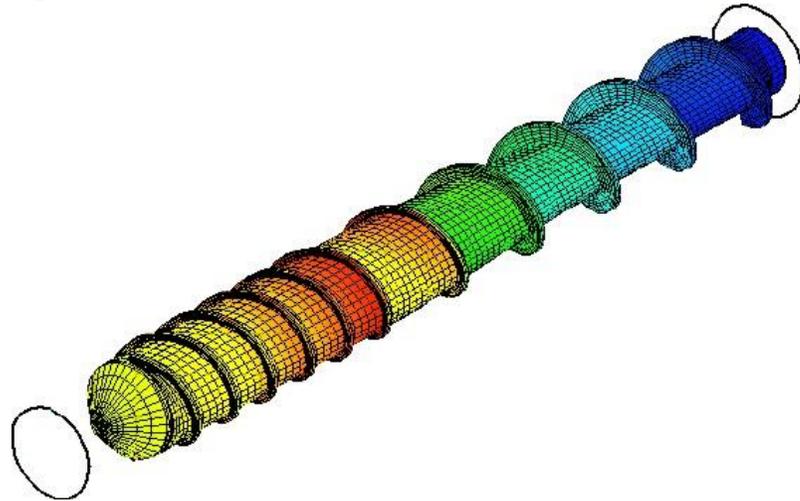


## Andamento P, T Simulazione

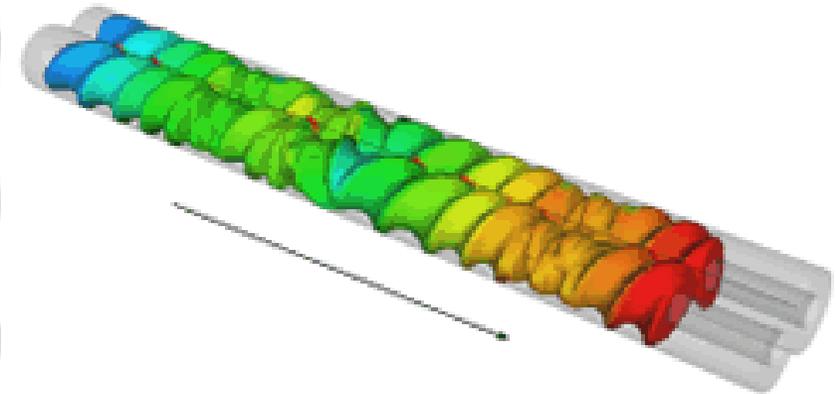
Profilo della vite, pari alla misura della lunghezza di ciascuna zona della vite.

Ad esempio:

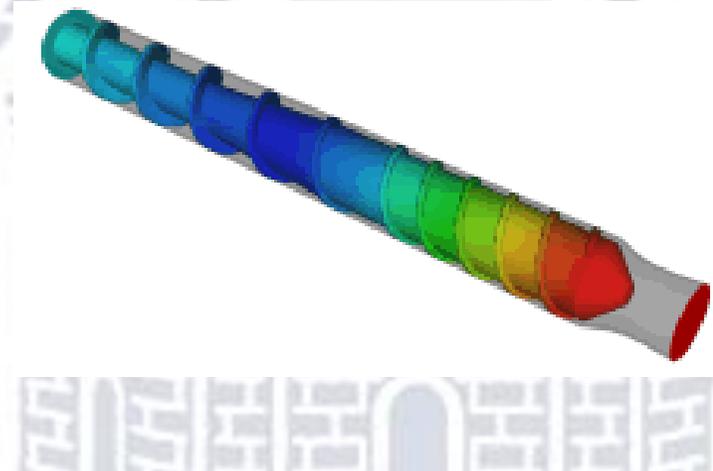
- aumentando la lunghezza della zona di alimentazione, si può incrementare la produttività del sistema.
- Incrementando la zona di transizione, si riduce il calore da scorrimento ed aumenta la compressione della resina.
- Incrementando la zona di dosaggio, si può ottenere una pressione maggiore per accumulare il materiale prima della filiere.
- Se la lunghezza della zona viene diminuita, avviene l'opposto.



Distribuzione P in vite singola



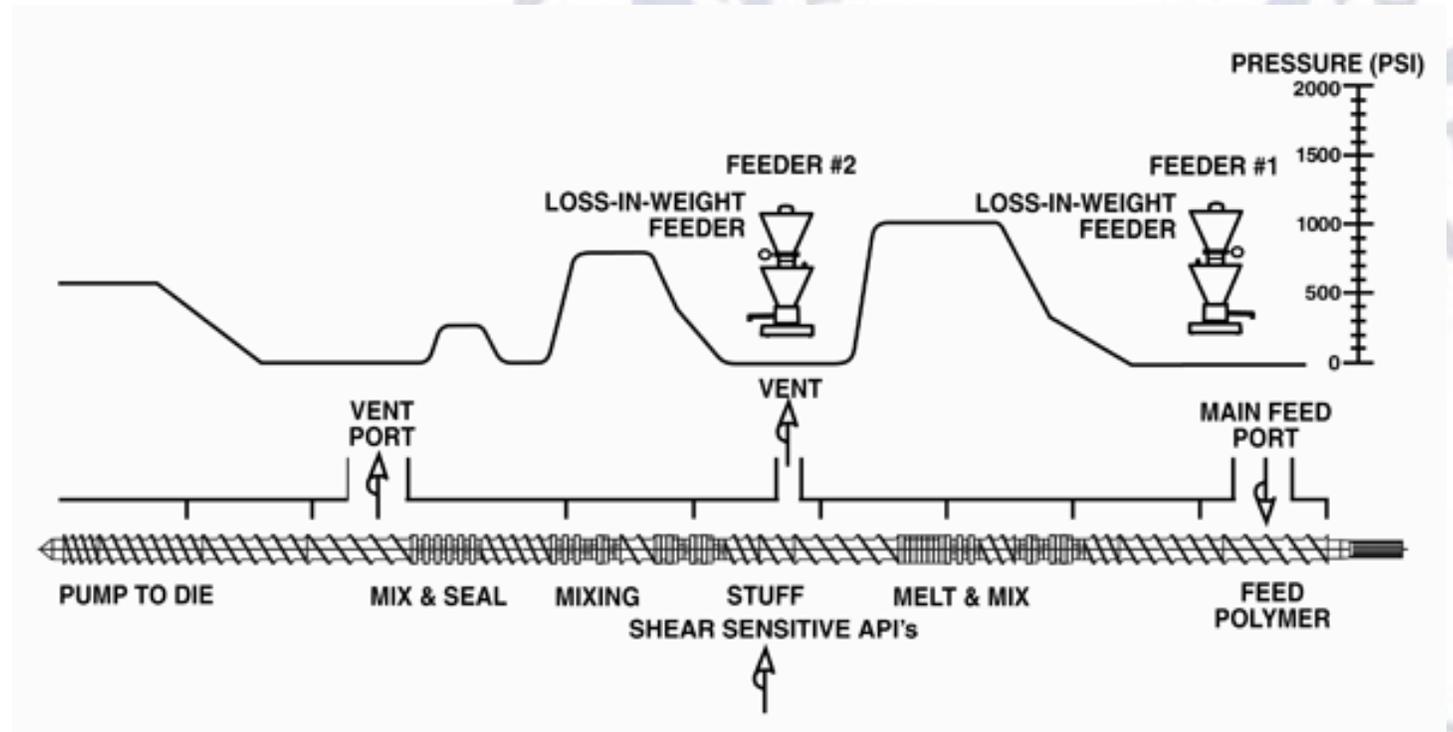
Distribuzione P in vite doppia



# Viti reali

Produzione di TPV (PP+EPDM)  
*TermoPlasticoVulcanizzato*

Estrusore a vite doppia con  $L/D > 40$   
e con 4 porte/ingressi

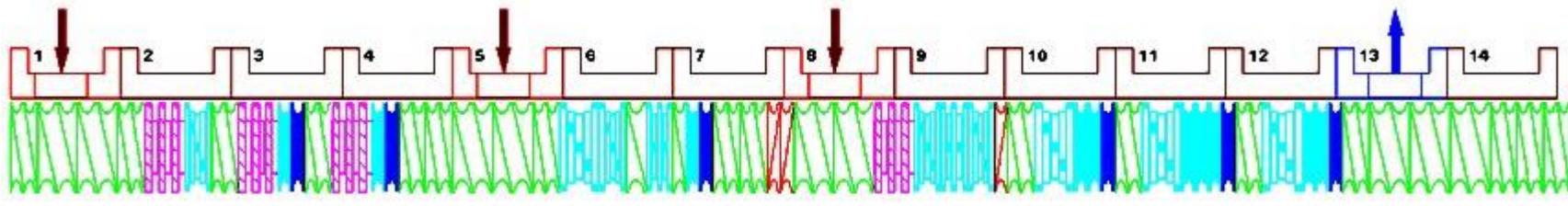


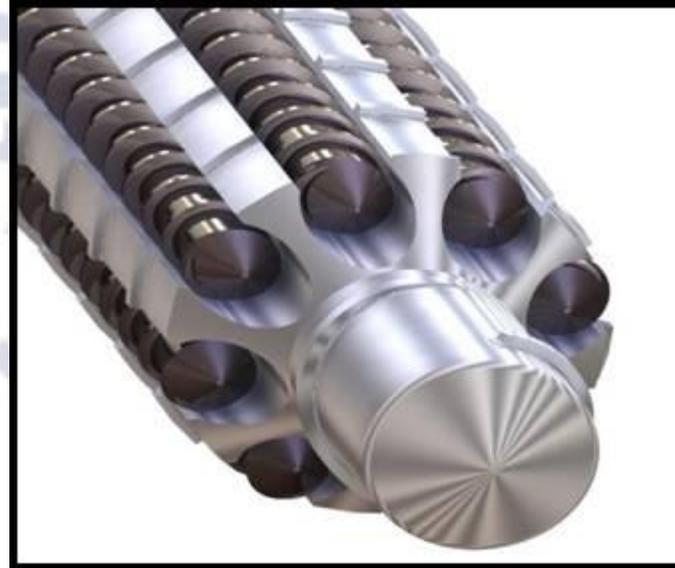
1- PP+EPDM

2- olio

3 cross-linking package

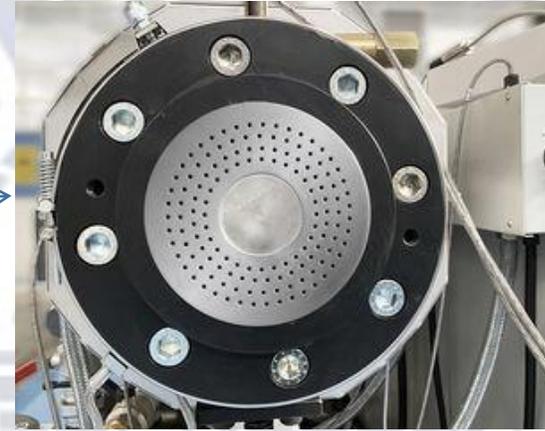
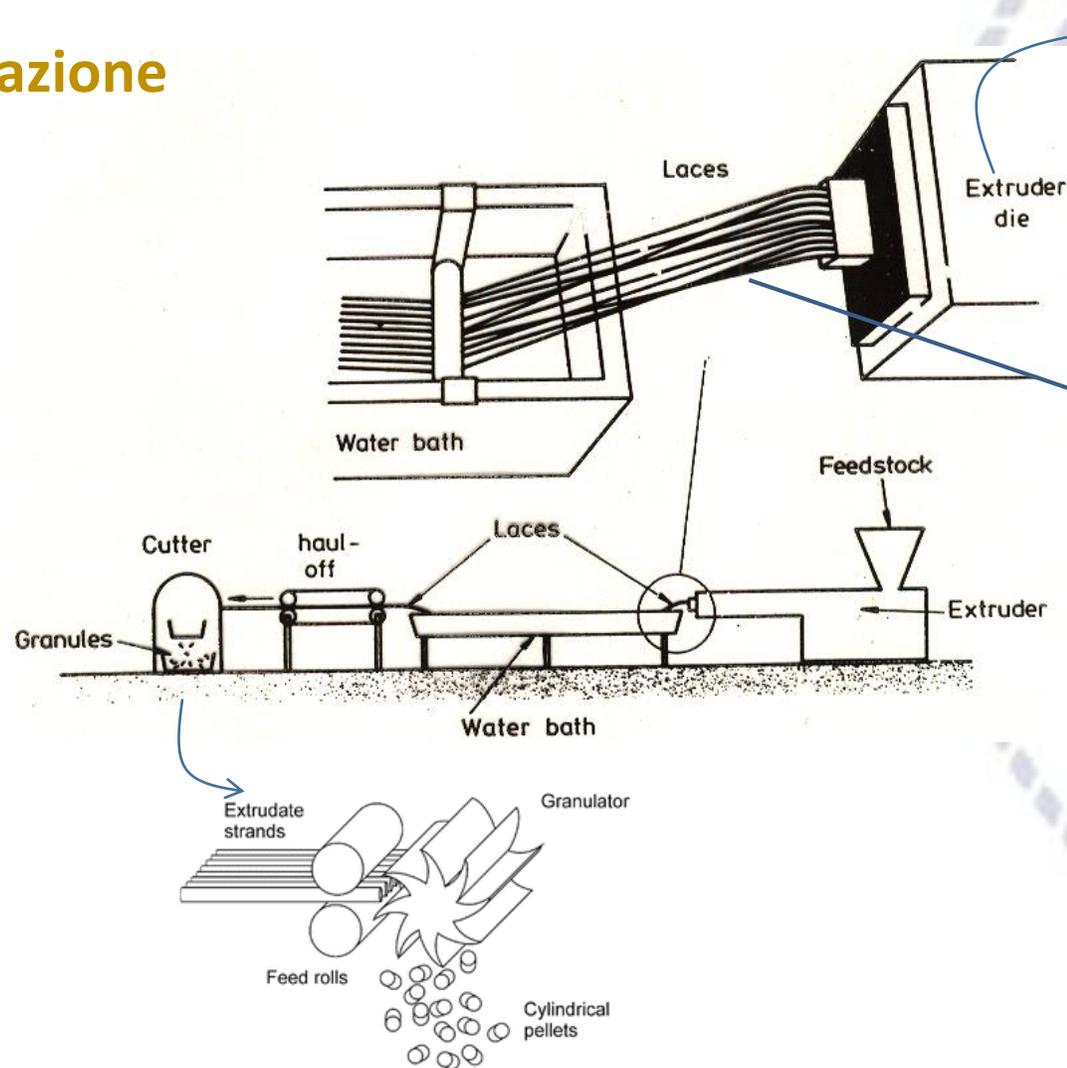
4 estrazione volatili

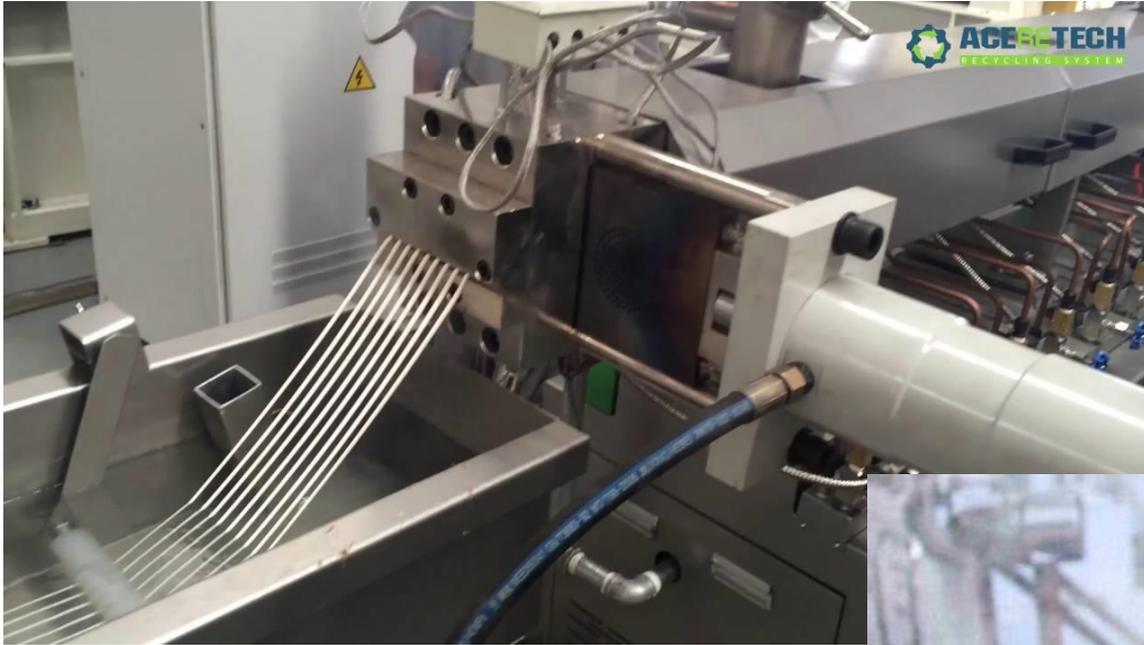




# Processi basati sull'estrusione

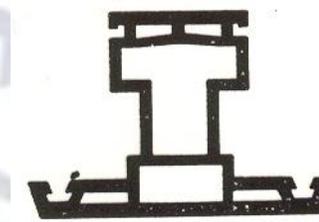
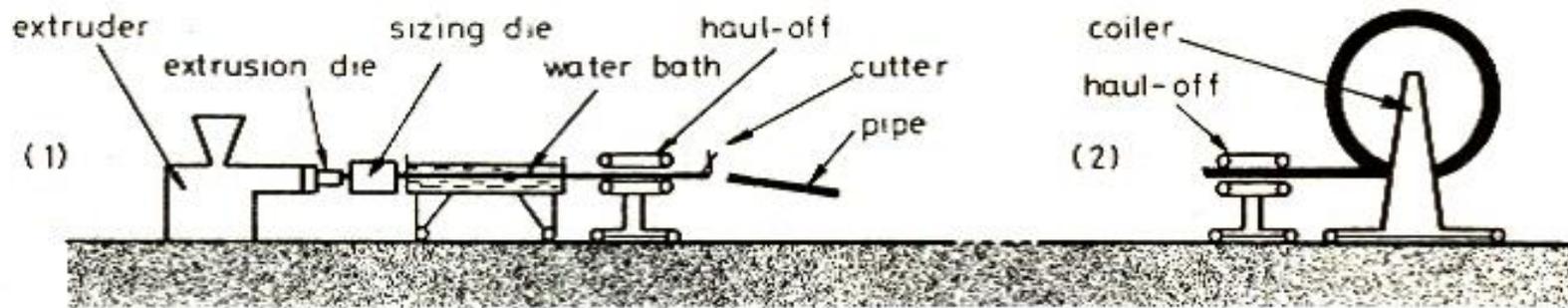
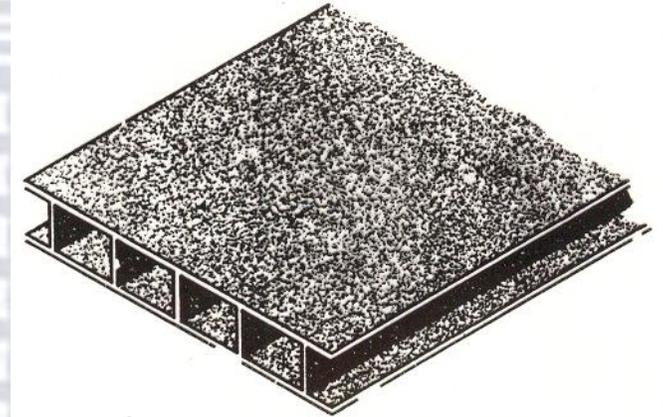
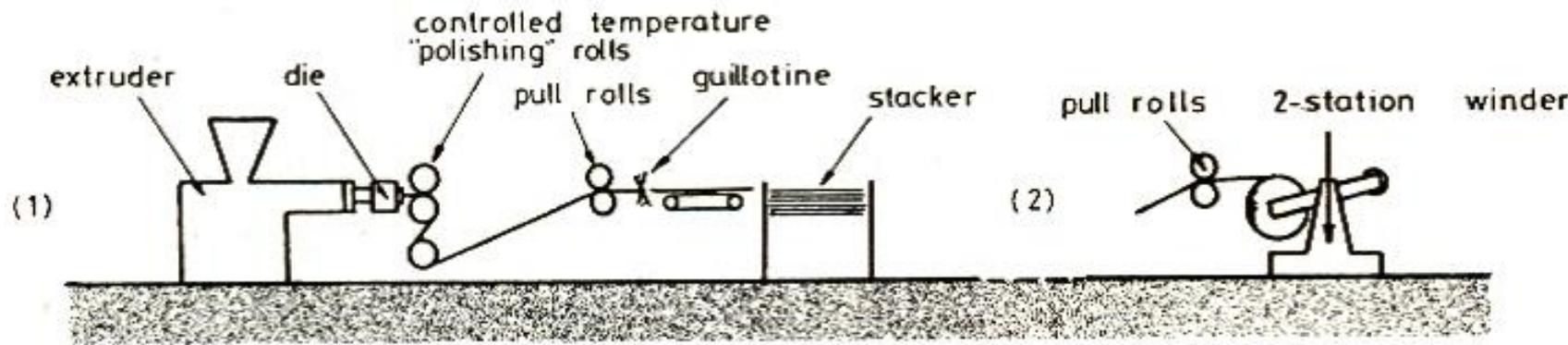
## Granulazione



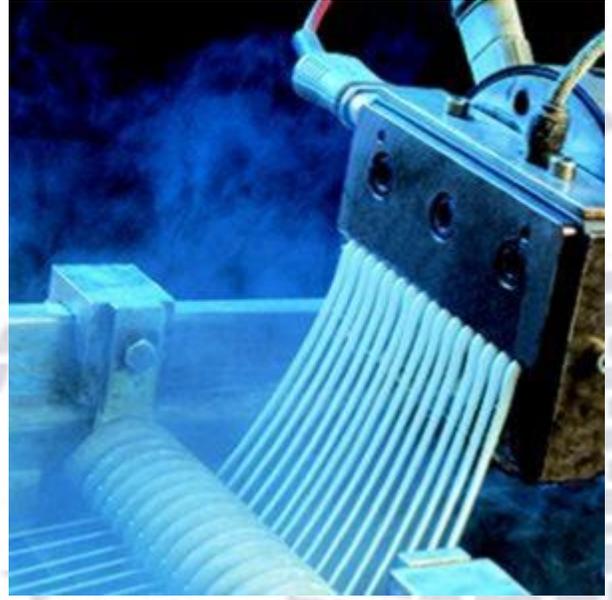


# Processi basati sull'estrusione

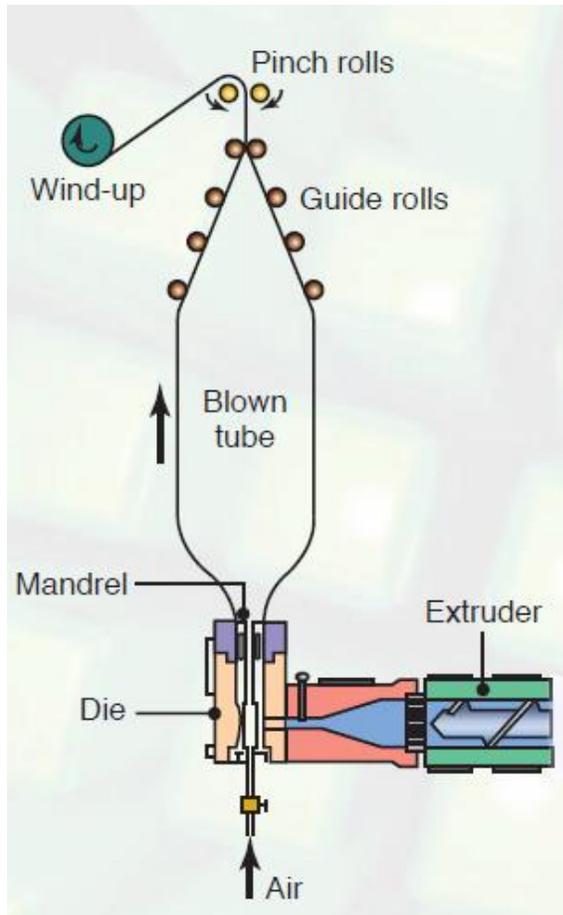
## Produzione di profilati e tubi



profili per finestre



# Processi basati sull'estrusione



## Produzione di film

- ▶ estrusione di un tubo
- ▶ raffreddamento con getto d'aria per evitare collasso
- ▶ insufflamento d'aria all'interno per gonfiarlo
- ▶ riduzione a film per schiacciamento tra rulli



# Processi basati sull'estrusione

Produzione di contenitori cavi per estrusione e soffiaggio



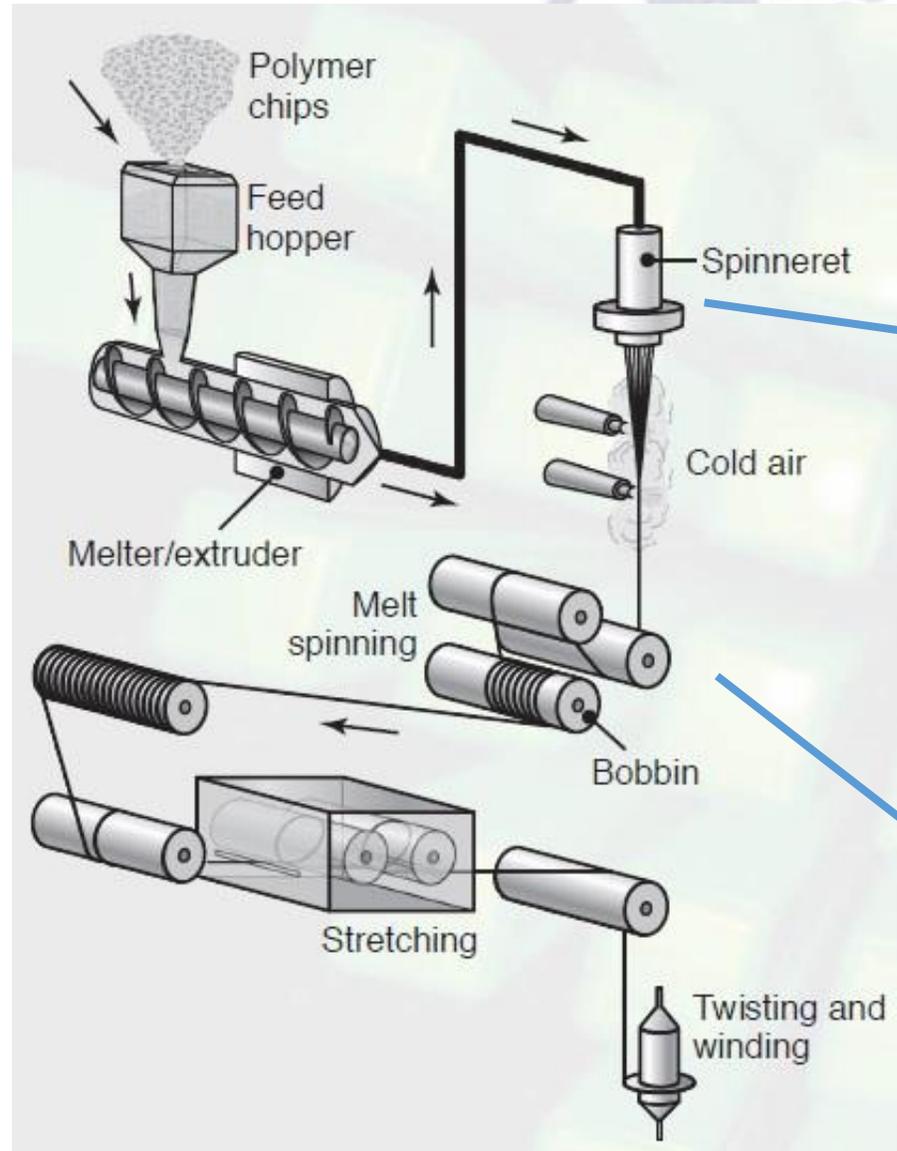
# Processi basati sull'estrusione

## Filatura dal fuso (melt spinning)

Produzione di fibre  
polimeriche

→ Tessuti

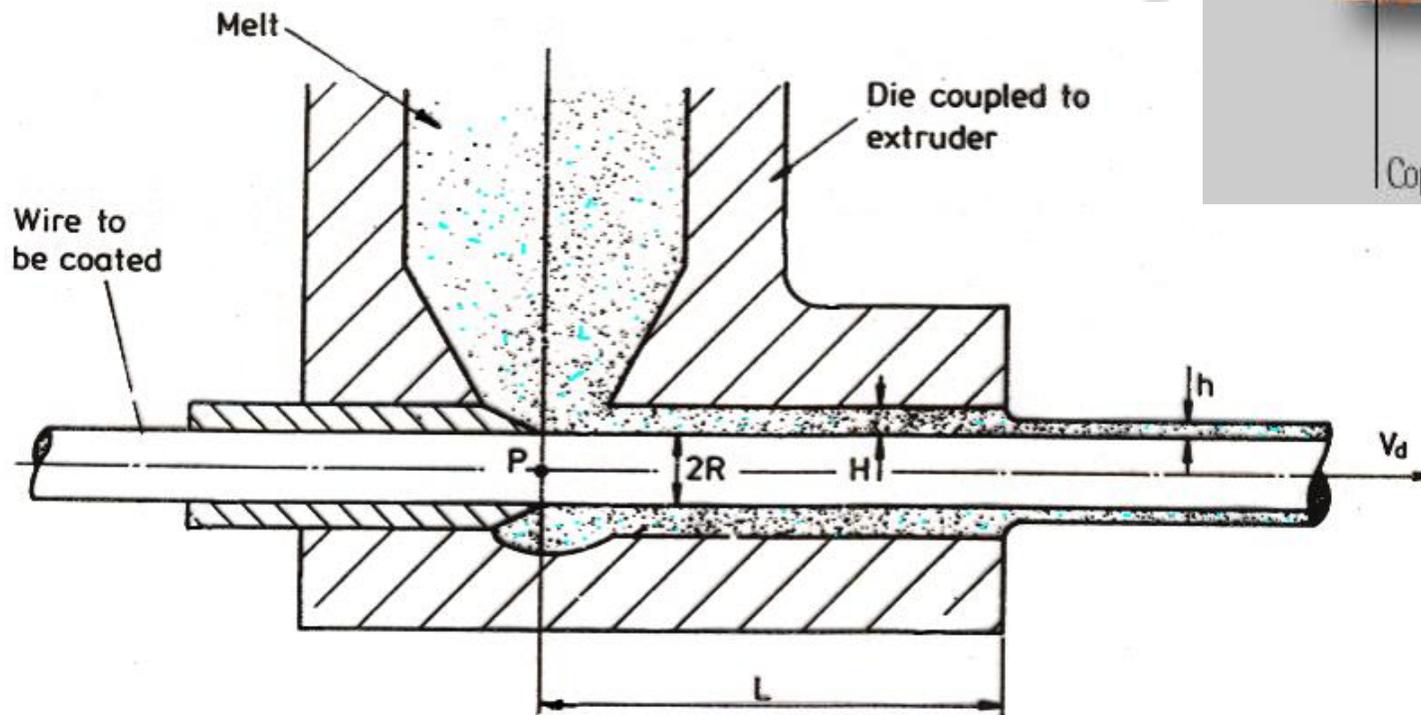
→ Rinforzi per compositi



# Processi basati sull'estrusione

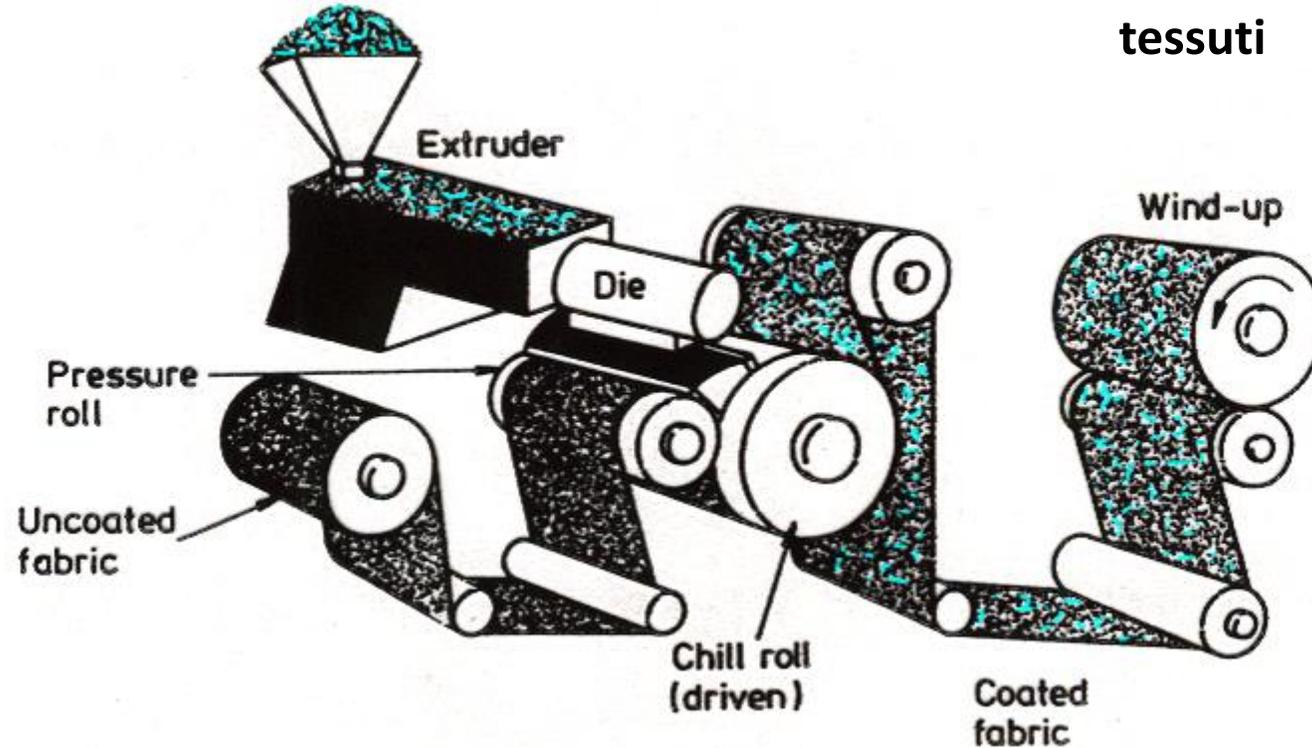
## rivestimenti con estrusione

### tubi e fili



# Processi basati sull'estrusione

## rivestimenti con estrusione

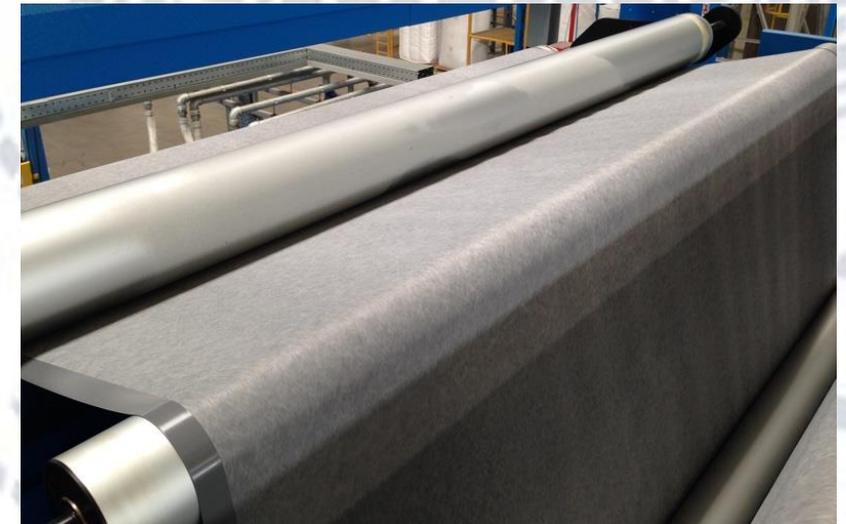
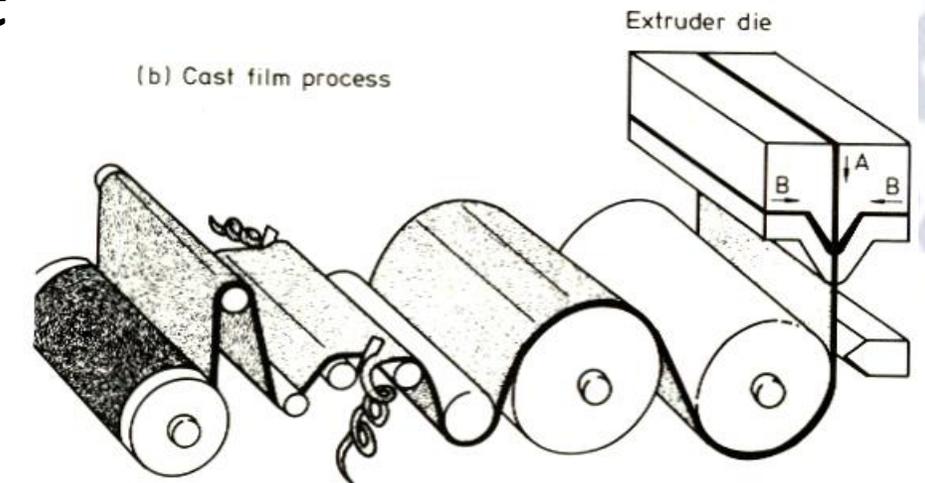
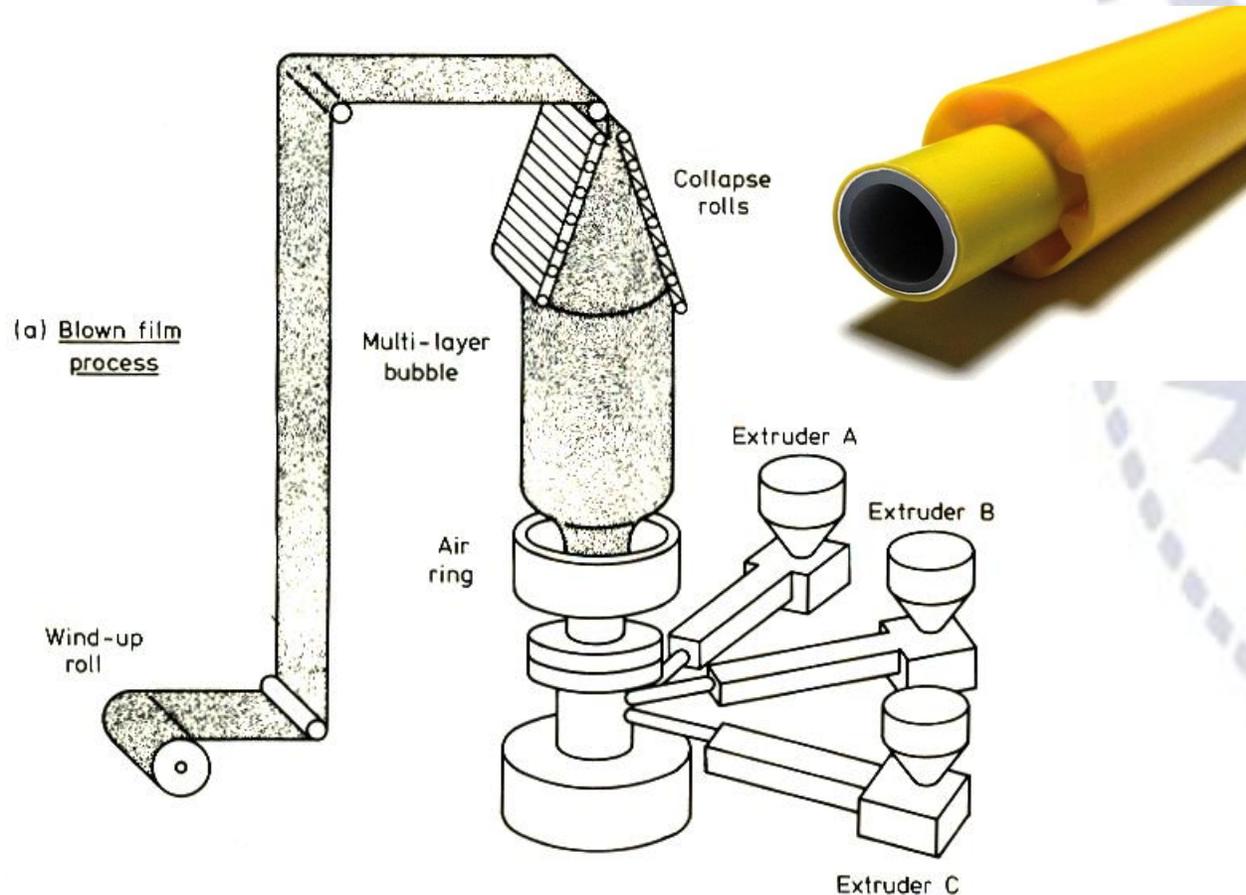


tessuti



# Processi basati sull'estrusione

## Produzione di multistrato - coestrusione

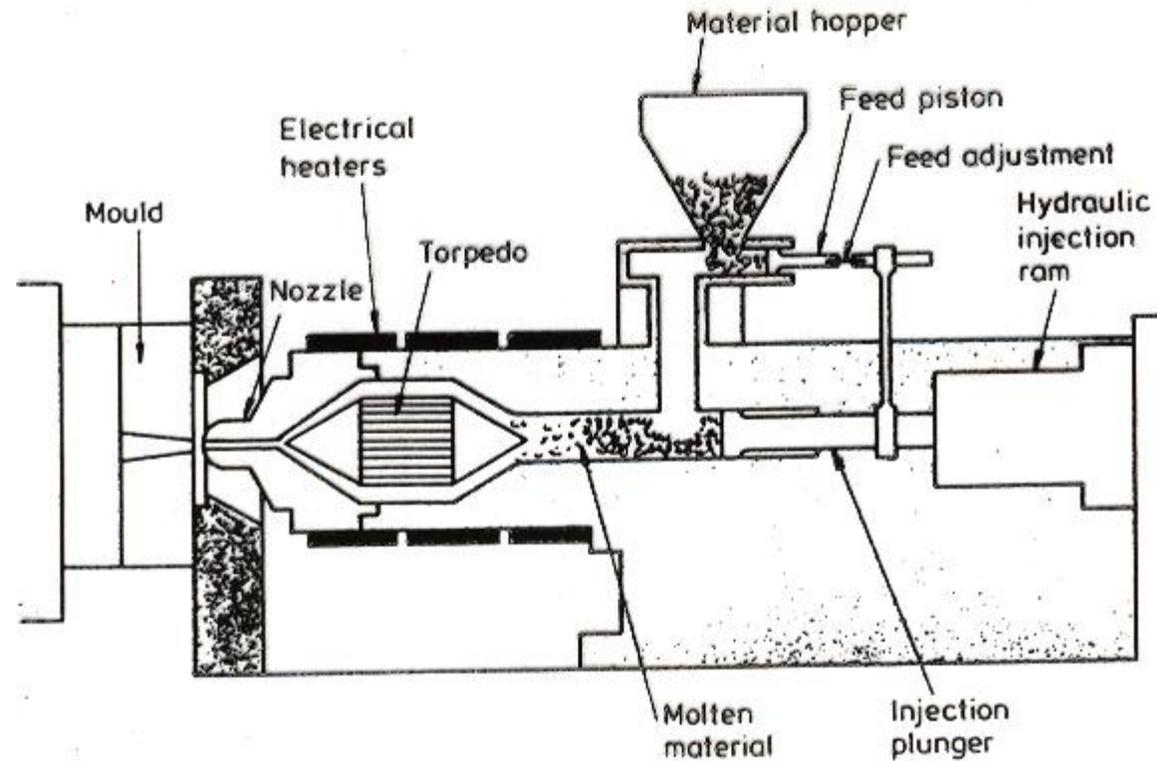


# Stampaggio per INIEZIONE (injection moulding)

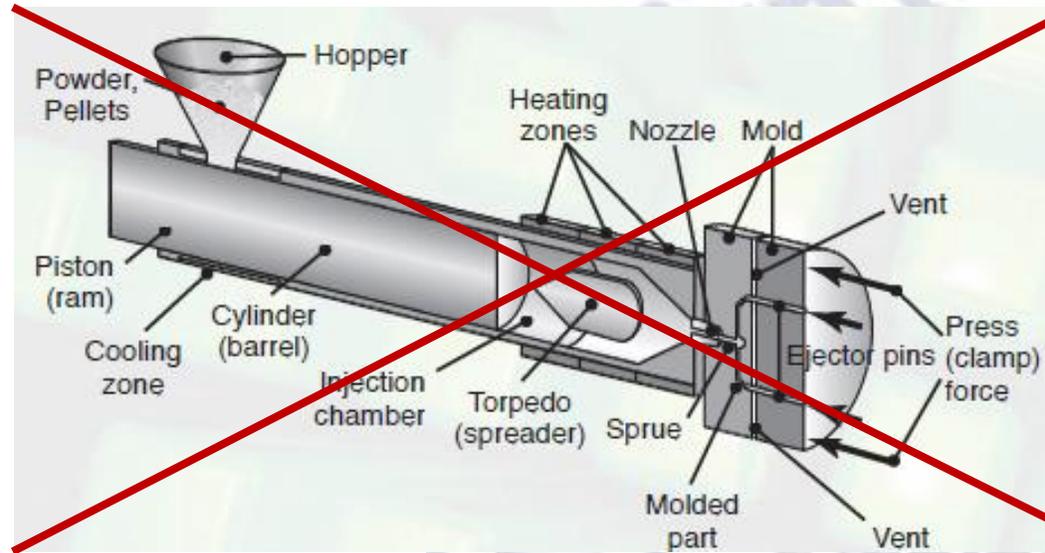
**Termoplastici**

prime machine: a stantuffo

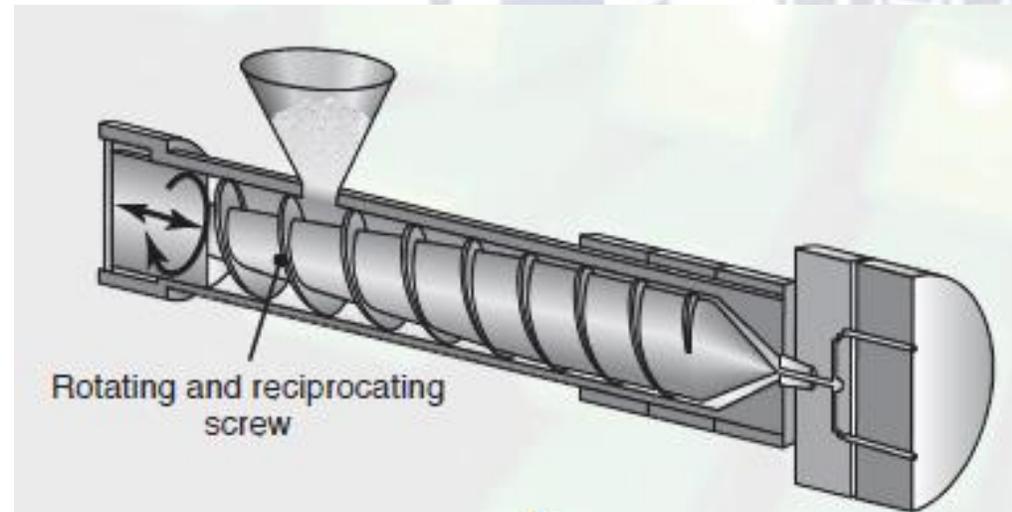
Hand Operated Injection Molding Machine!!



**a stantuffo**

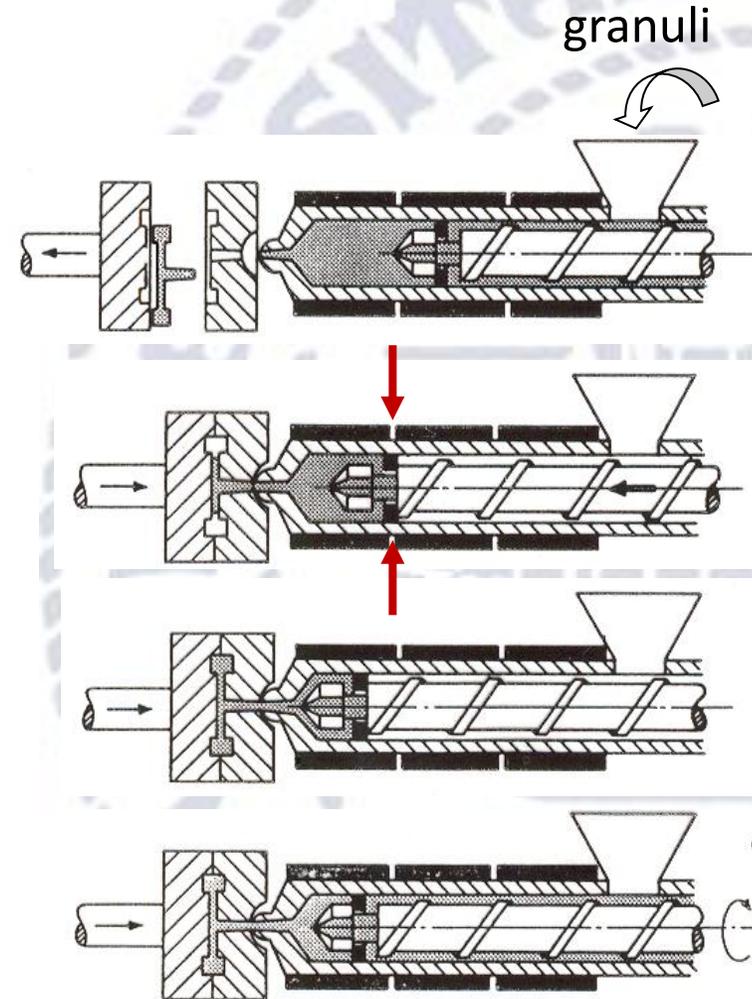


**Vite rotante**



## Oggi: processo a vite

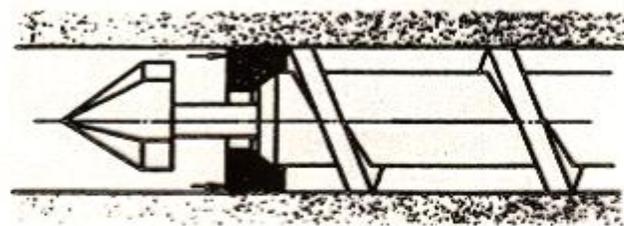
1. alimentazione del cilindro stampo aperto - scarico
2. chiusura stampo –
3. avanzamento vite (P)–T 200-300°C
4. iniezione nello stampo stampo riscaldato a 50°C
5. rotazione della vite, impedita da stampo  $\Rightarrow$  arretra causa pressione



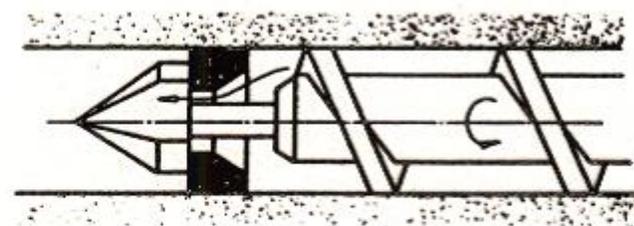
Elementi importanti:

- VITE
- STAMPO

La vite è simile a quella per l'estrusione,  $L/D=15-20$ ,  $P=200\text{MPa}$   
MA con presenza di *valvola di non ritorno*



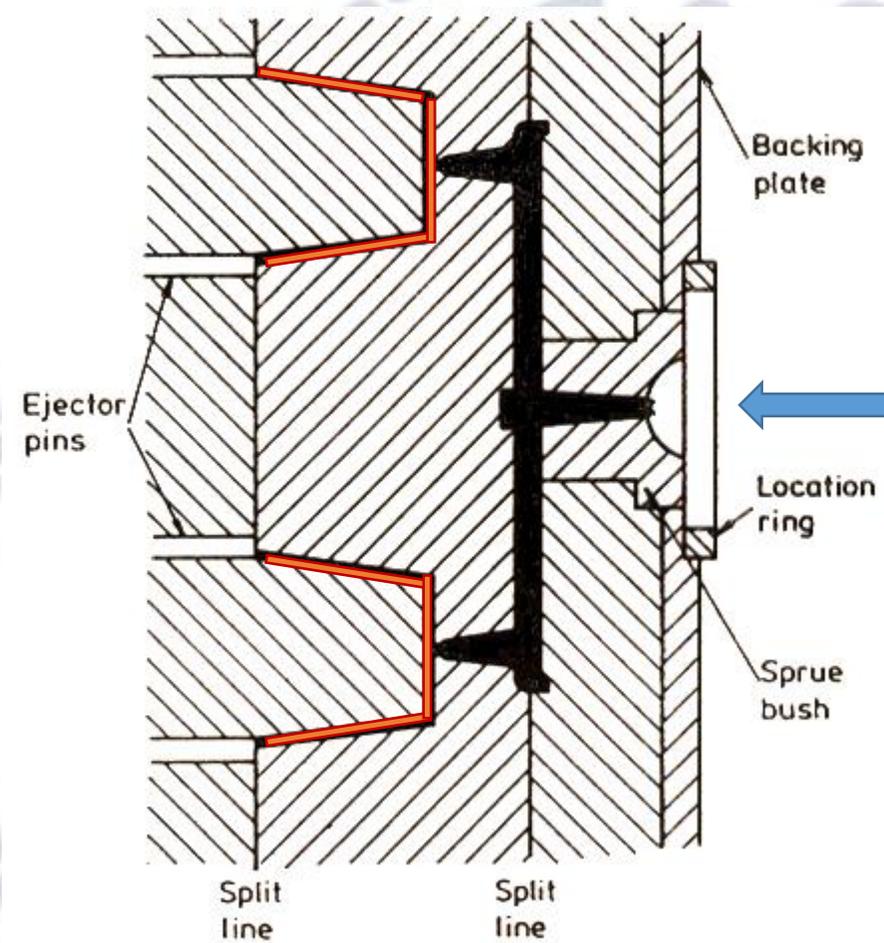
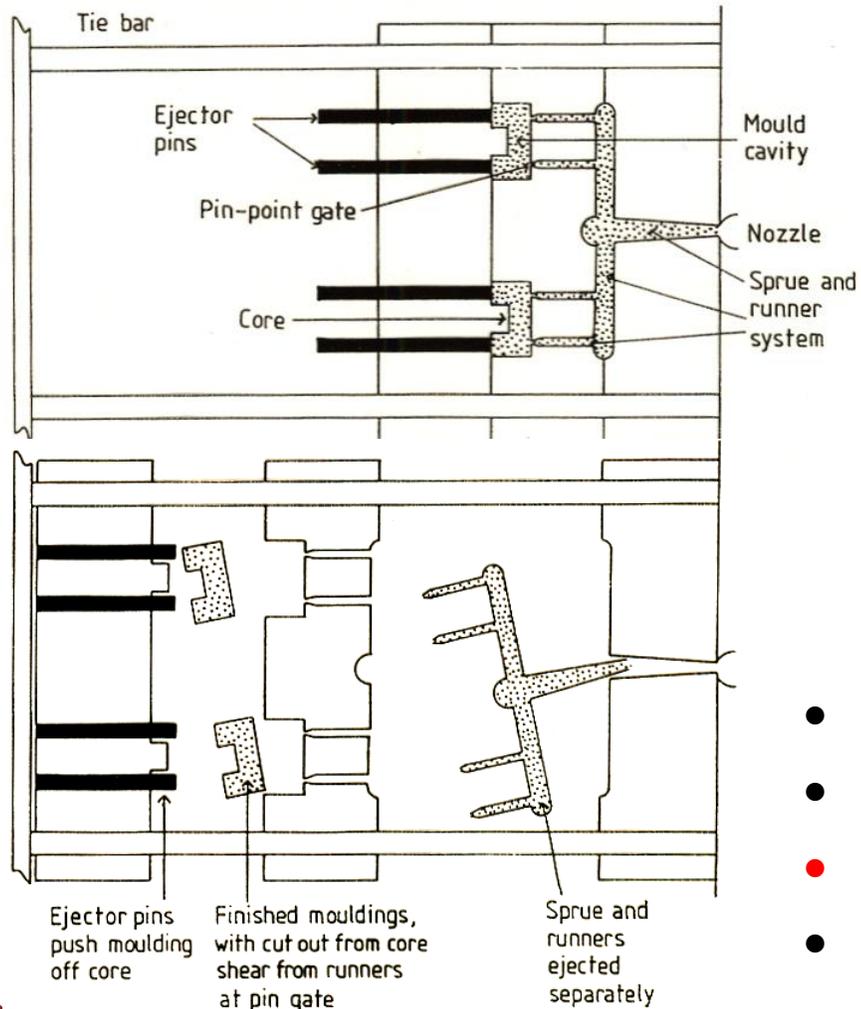
(a) Valve closed



(b) Valve open

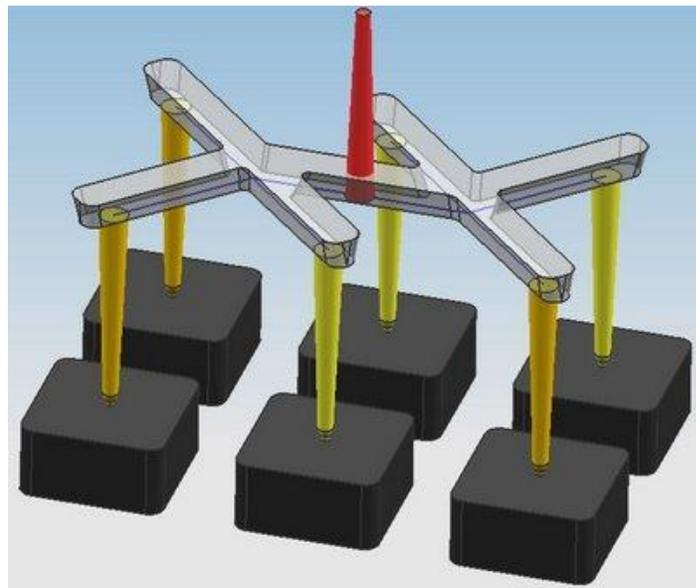
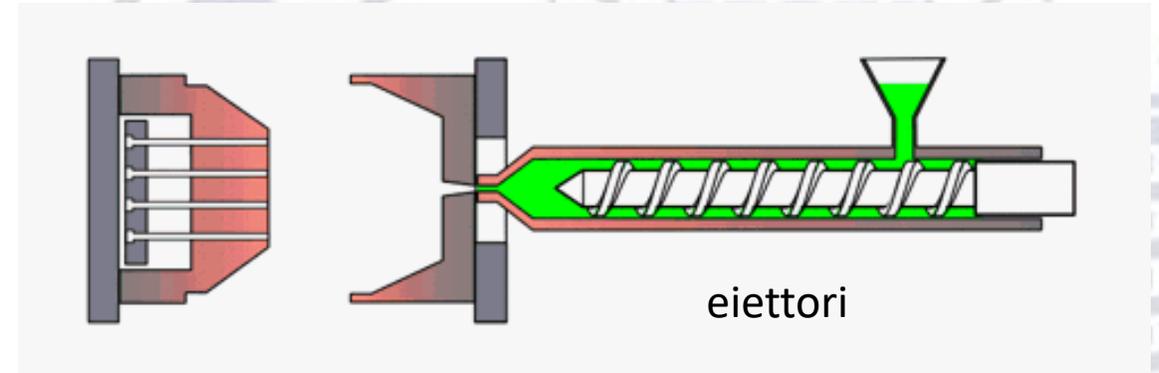
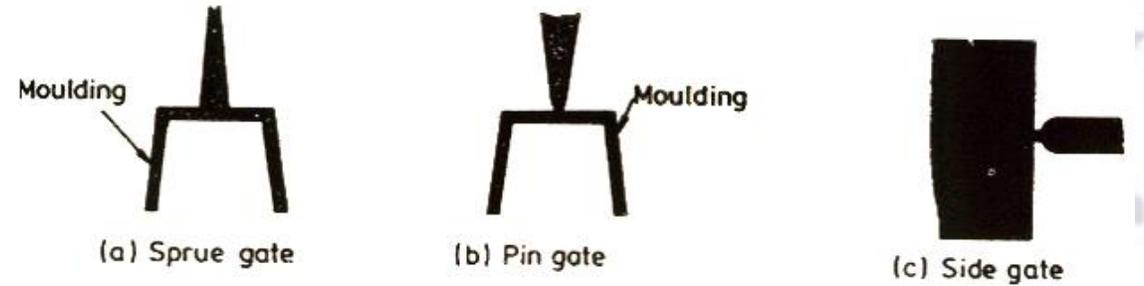
**Attenzione per PVC:** a livello delle valvole ci può essere accumulo di Q

# Lo STAMPO

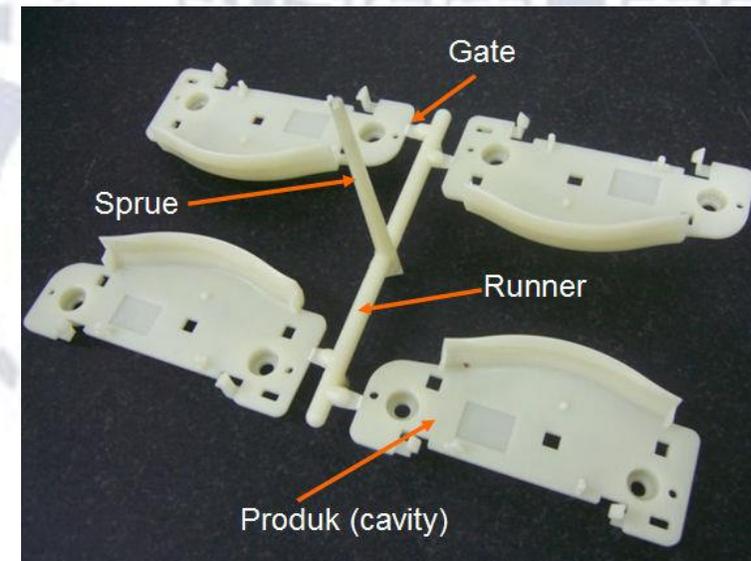


- dev'essere apribile
- chiusura meccanica o idraulica
- **! progettazione !**
- fori di sfogo per uscita dell'aria –stretti ( $\Phi=0.025$  mm) per non essere riempiti dal fuso
- sistemi di riscaldamento - raffreddamento

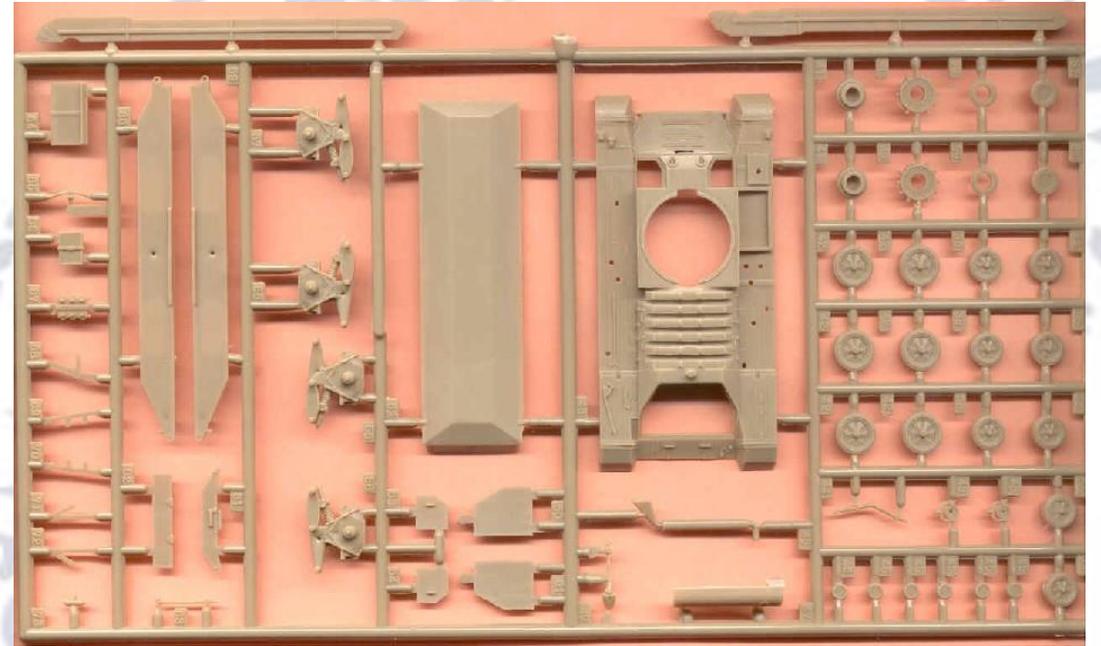
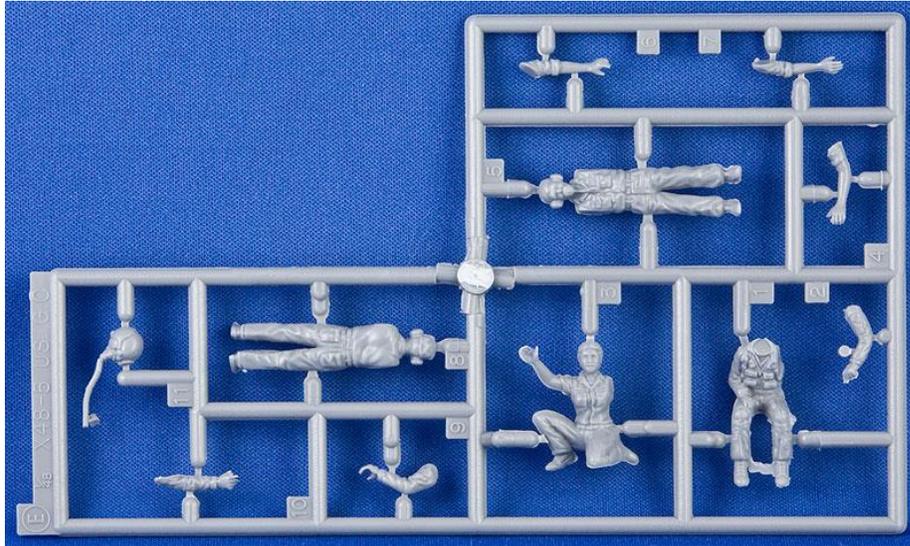
Canali di colata di diverse forme: ciascun progetto di stampo per iniezione deve prevedere un gate, oppure un'apertura che consente alla plastica fusa di essere iniettata nella cavità dello stampo. Il tipo di gate, il design e la posizione possono avere effetti sull'impaccamento della parte, sulla rimozione del gate o sull'aspetto della parte stessa, sulle dimensioni della parte e la sua distorsione.



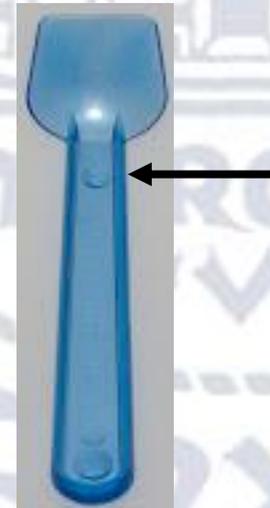
Le materozze sono a perdere!!!

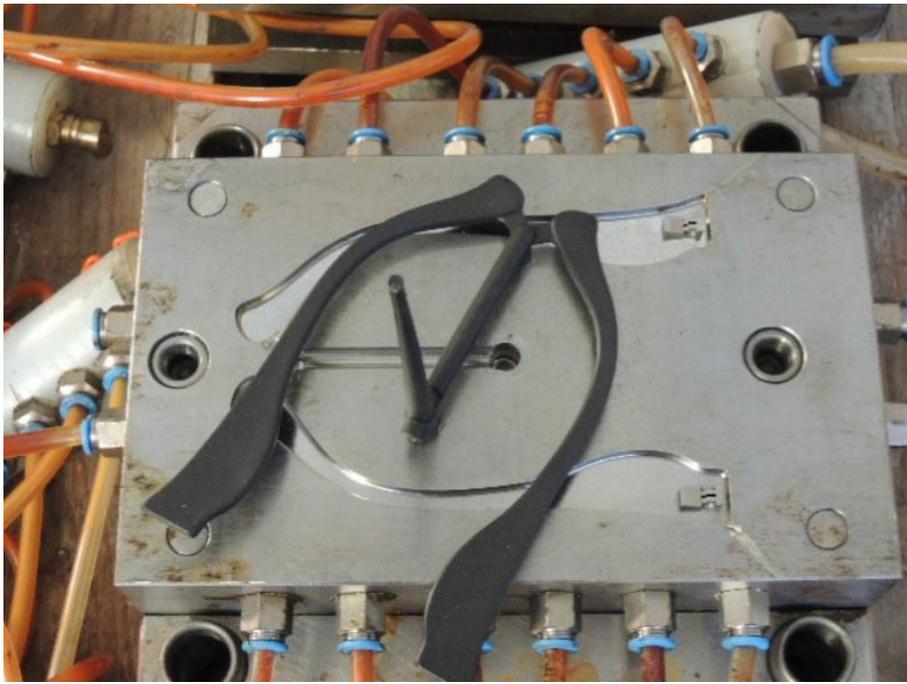


# Formano materozze (sprue) diverse

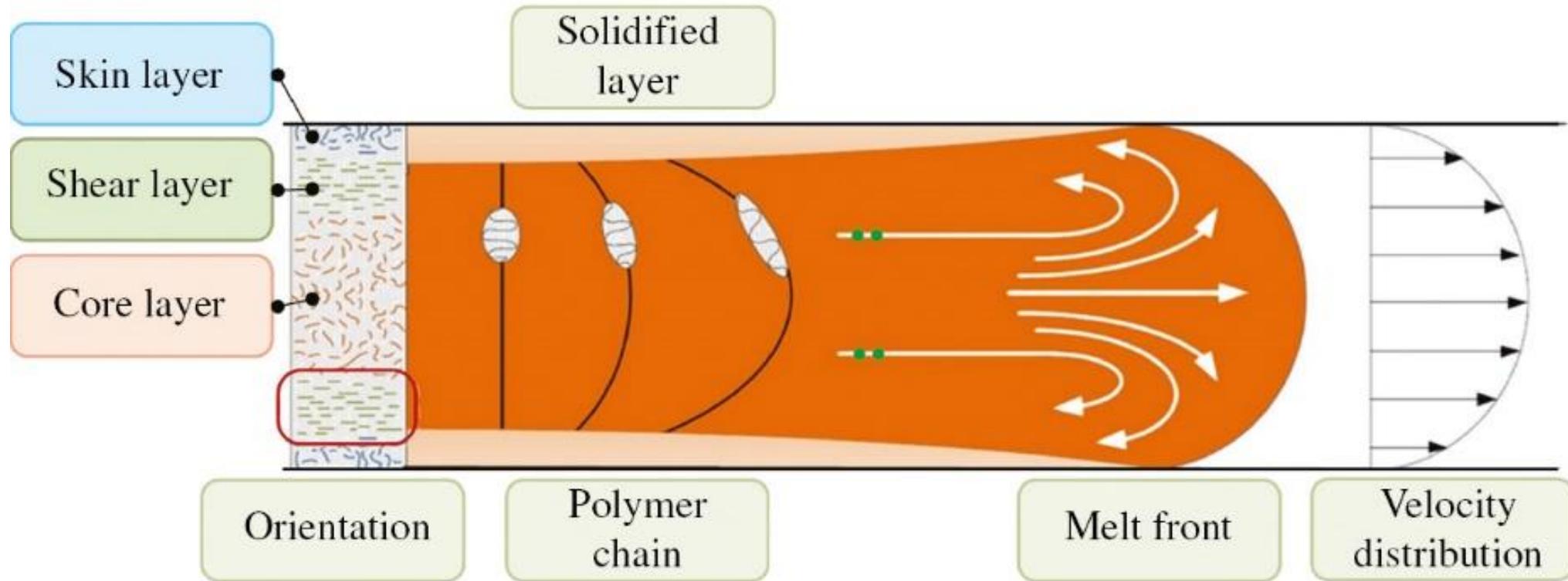


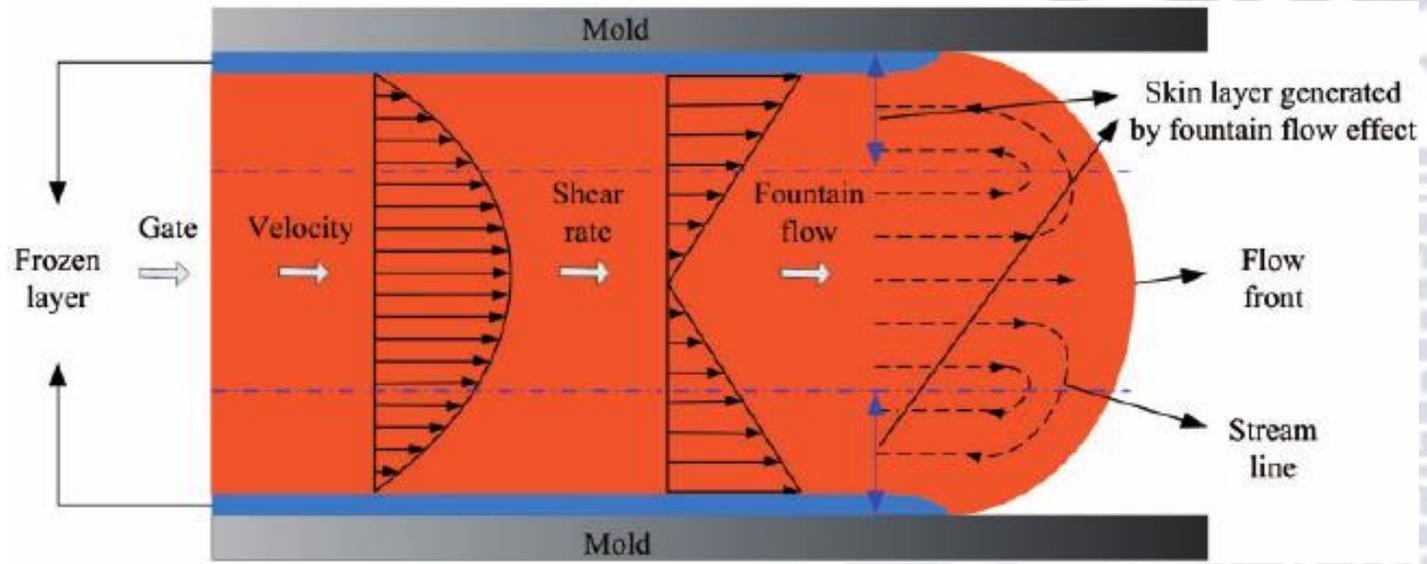
Impronta del gate



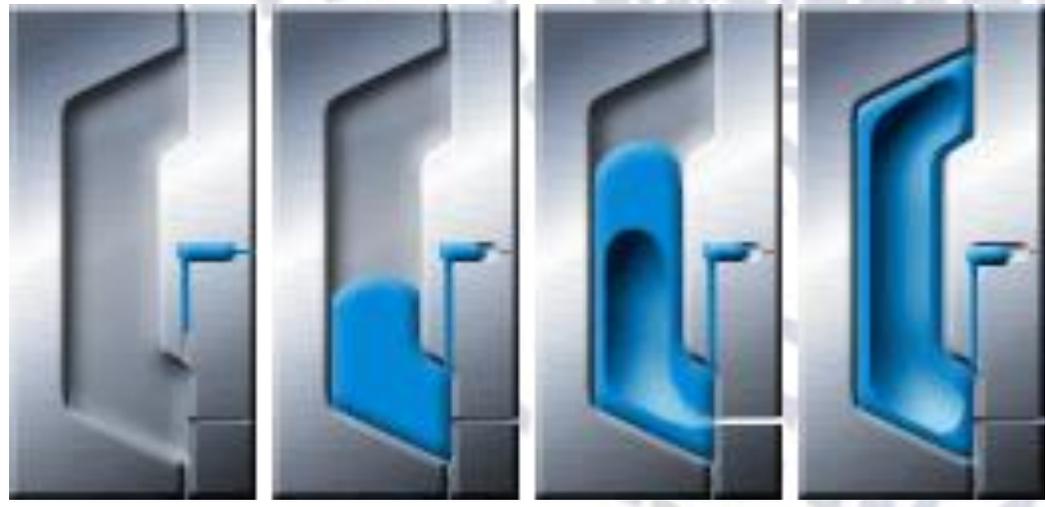
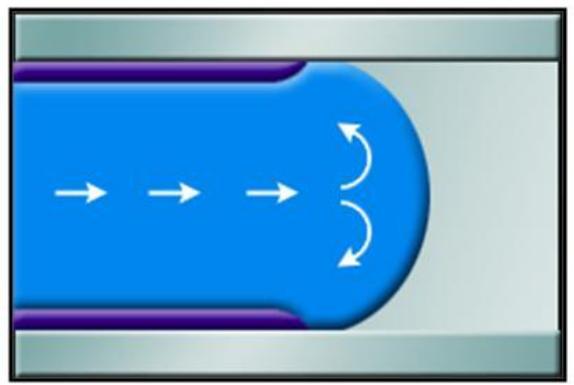


# Flusso del fuso nello stampo: a fontana



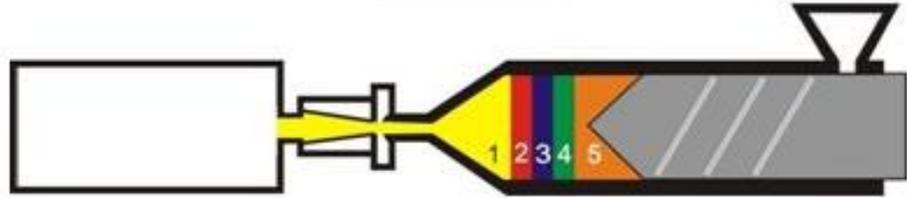


Ordine di riempimento dello stampo

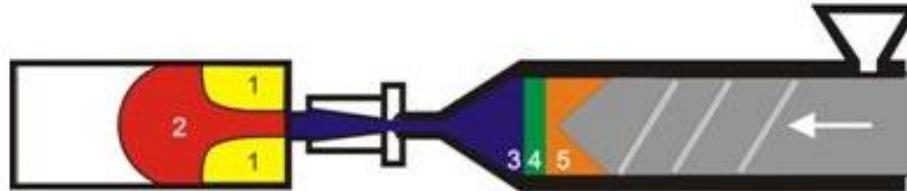


# Ordine di riempimento dello stampo

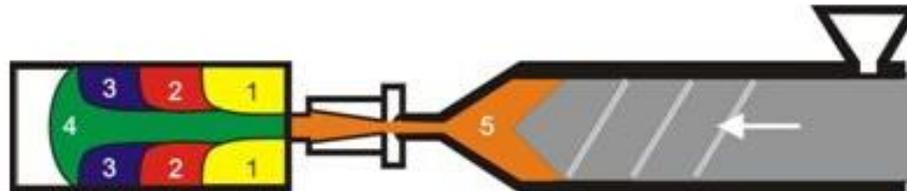
As heated plastic is moved out of the injection unit and into the mold, it exhibits "Fountain Flow" behavior.



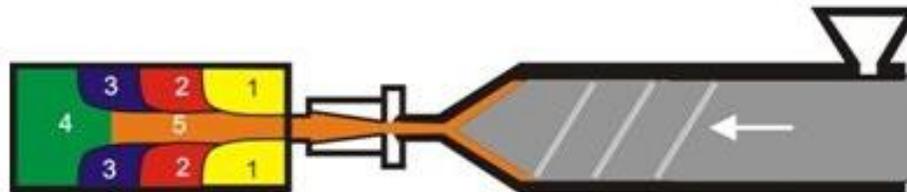
Plastic from Area #1 enters the cavity first and flows to the wall.



Plastic from Area #2 flows through the plastic from Area #1 and flows to the wall.



Plastic from Areas #3 and #4 flow through the plastic that entered the cavity first.



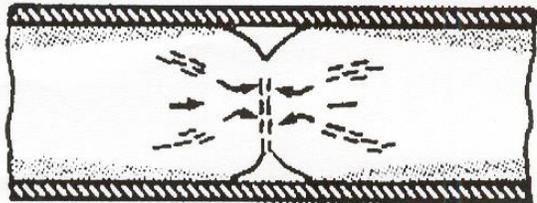
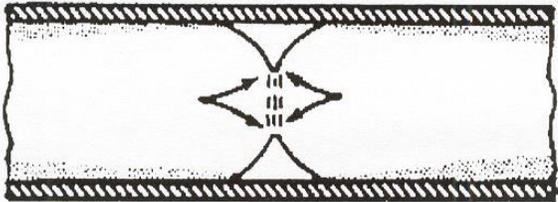
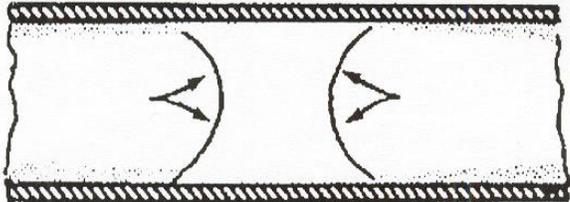
Finally, plastic from Area #5 fills and packs the center area of part.



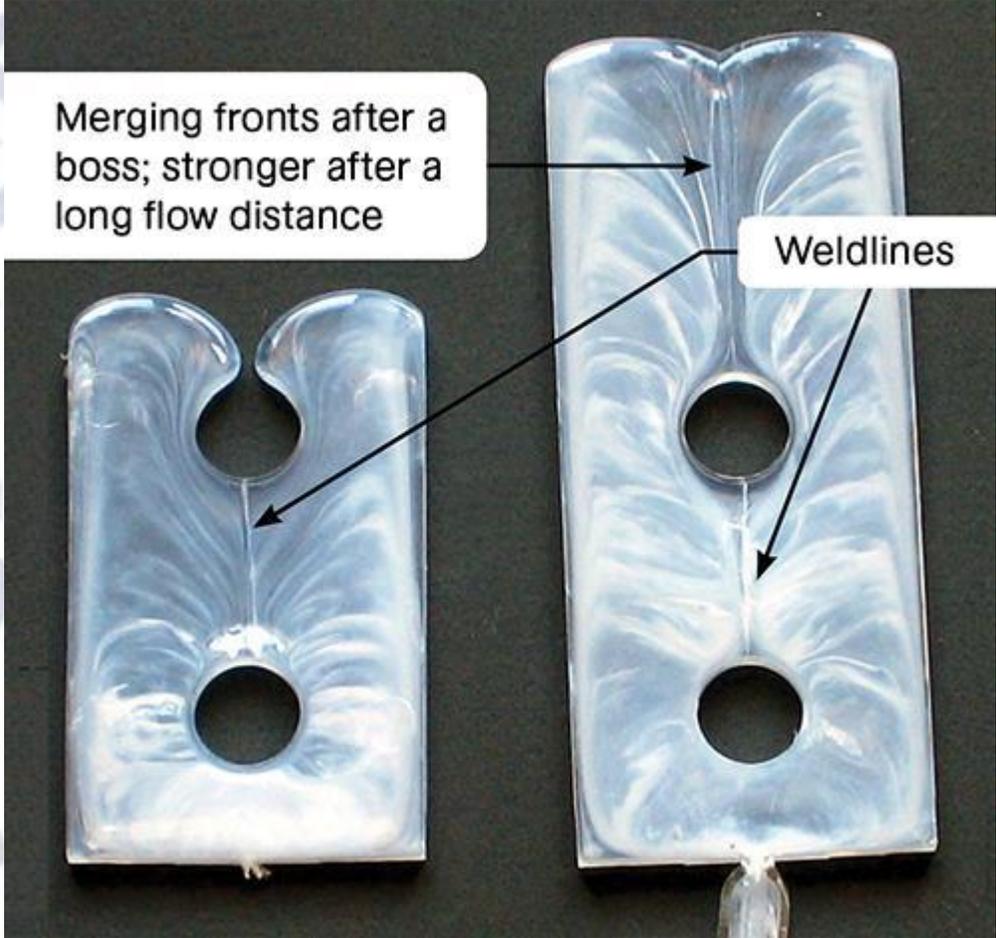
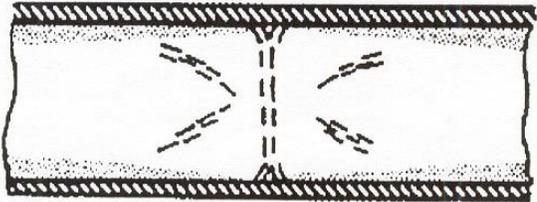
# Difetti

## *Saldature*

se ci sono più punti di iniezione

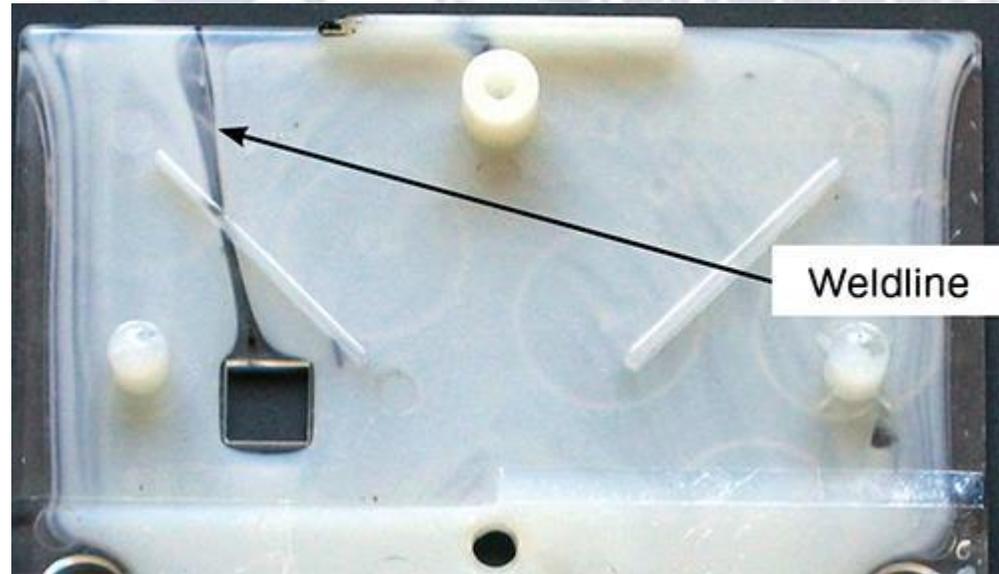
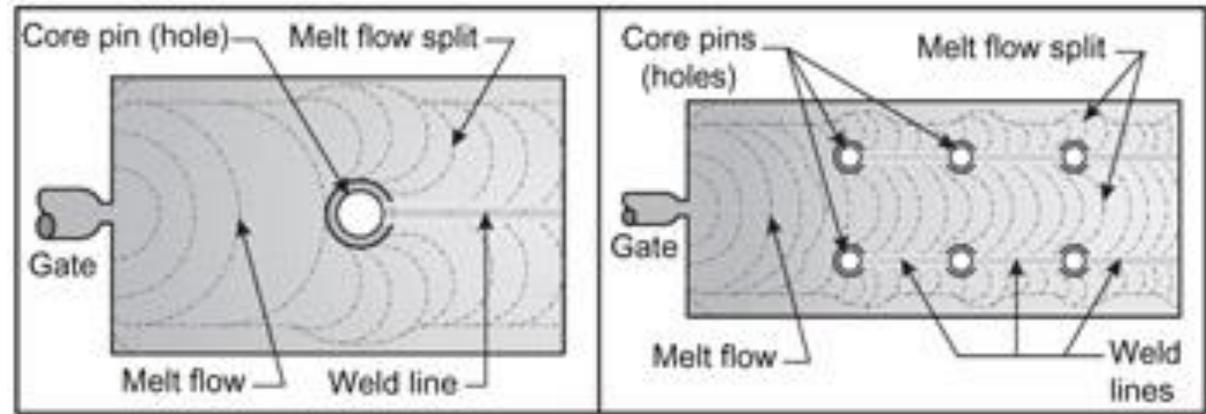


Intrusion by hot core



## *Saldature*

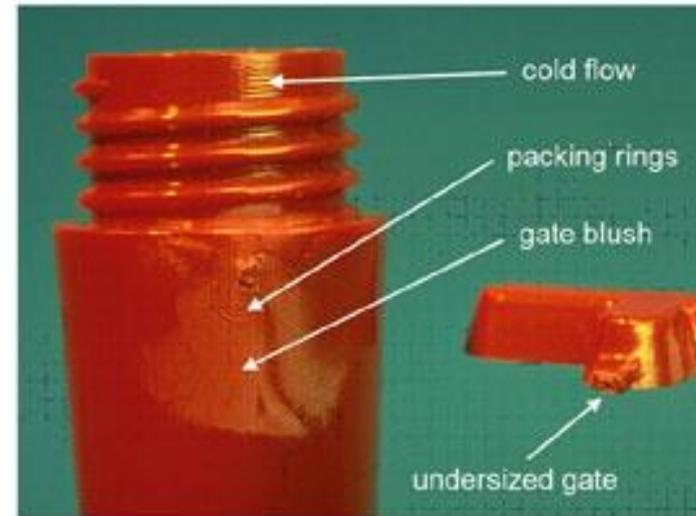
se ci sono ostacoli interni



# Difetti



*flusso freddo*

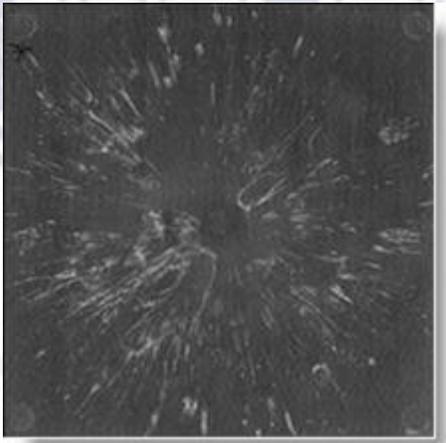
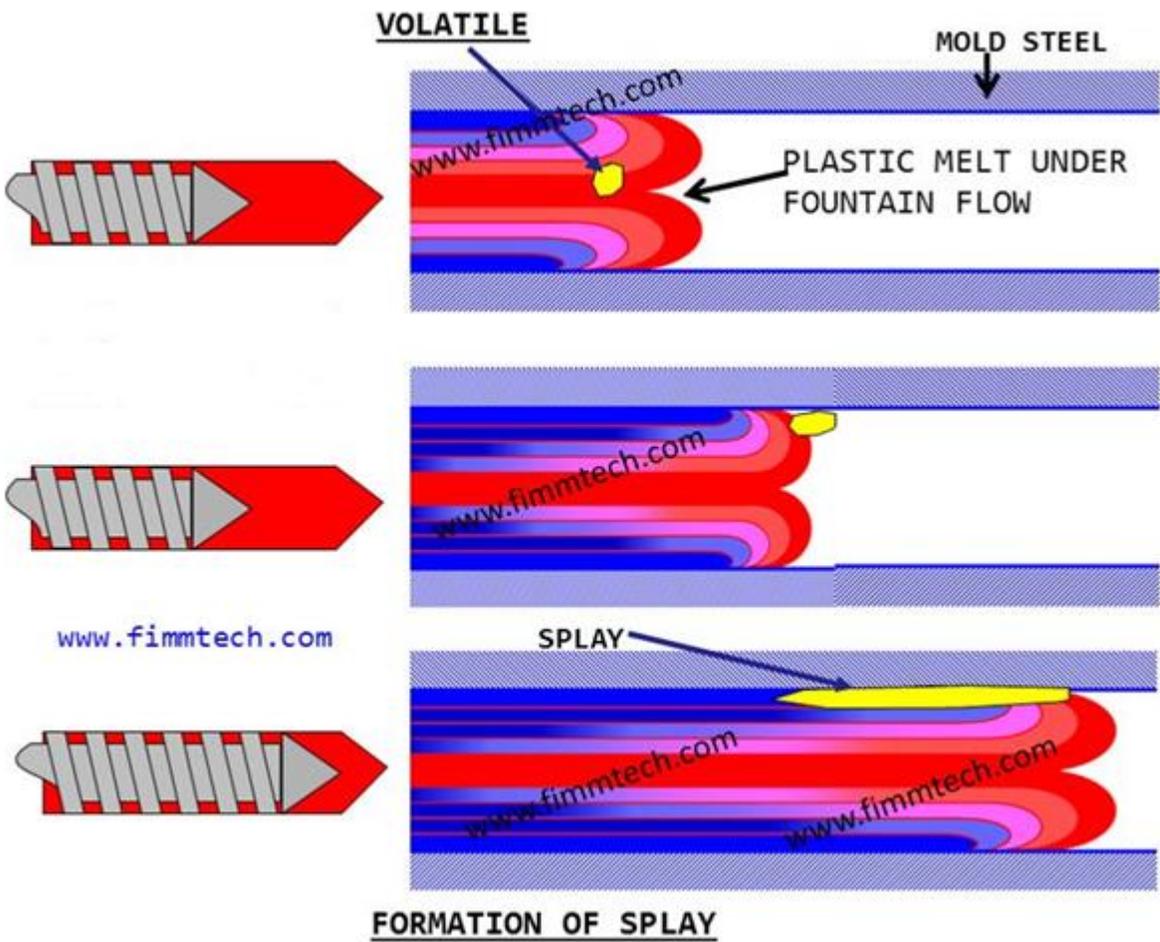


*Gate blush*

- Gate troppo piccolo, limita il flusso e il materiale si degrada (blush)
- Velocità di riempimento troppo alta, la plastica fusa reagirà alla restrizione del flusso al gate
- Pressione di iniezione troppo bassa, il flusso «strappa» (rallenta e accelera)
- $T_{\text{fusione}}$  troppo alta o troppo bassa, scorrimento non corretto, riempimento dello stampo non corretto
- Diametro ugello troppo piccolo, limita il flusso nei canali e nei gate

# Difetti

## Cattiva essiccazione



Splay o silver marks

# Difetti

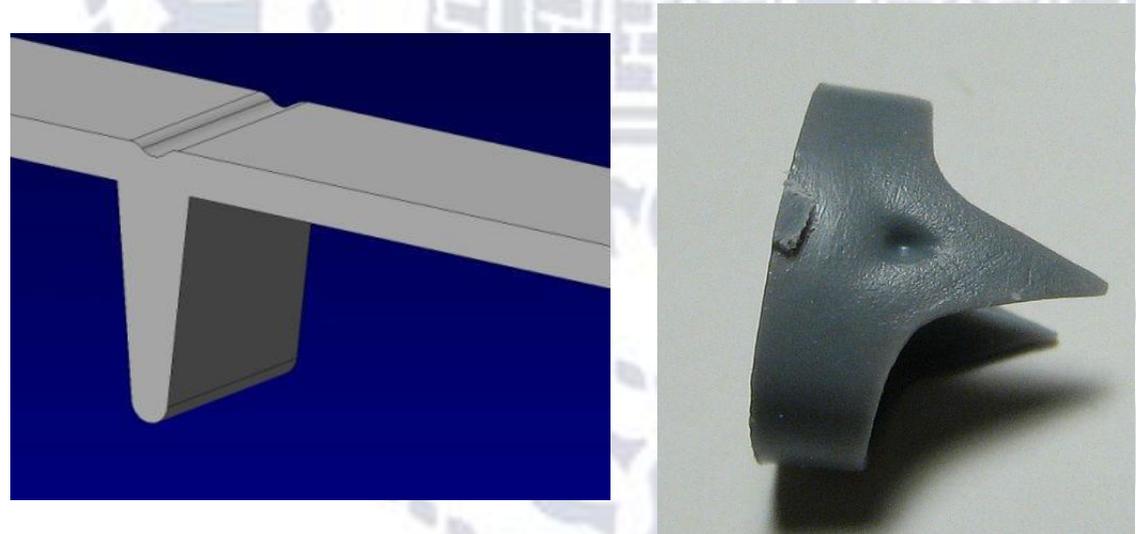
## *Pressione-tempo*



## Mancato riempimento



## Depressioni



# I difetti più comuni



**AIR BUBBLE**



**SHORT FILL**



**SCORING**



**BURN & OIL  
MARKS**



**SPRAY MARK**



**FLASH**



**BLACK DOTS**



**BORE BLOCK**



**SHRINKAGE**

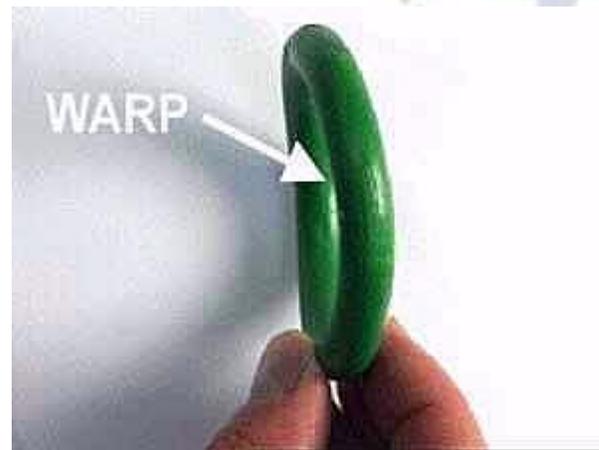
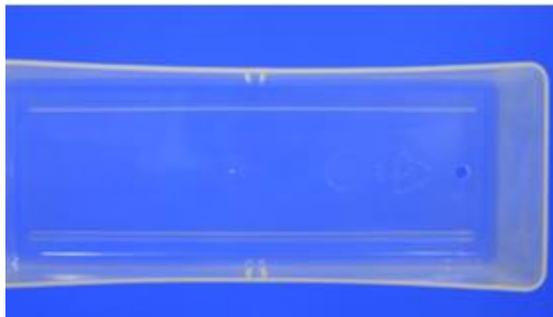
**Bolle d'aria**



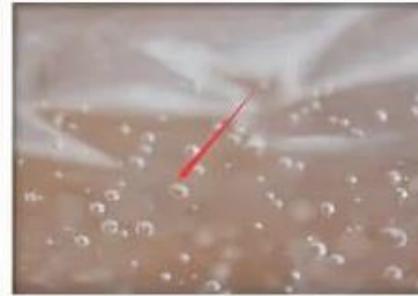
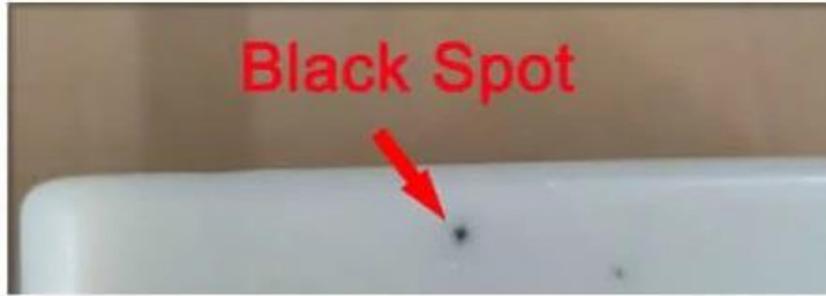
**Flash**



**distorsione**

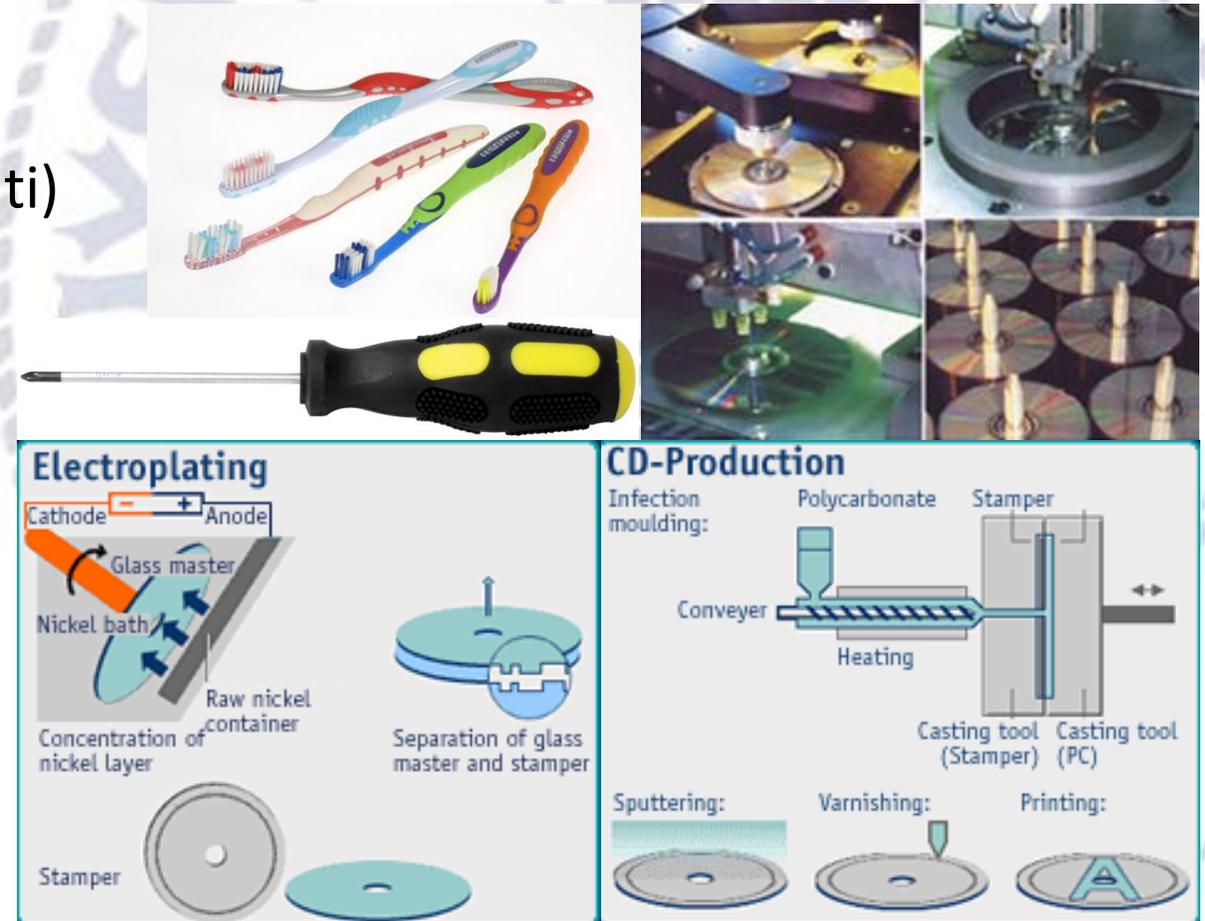


PC/ABS

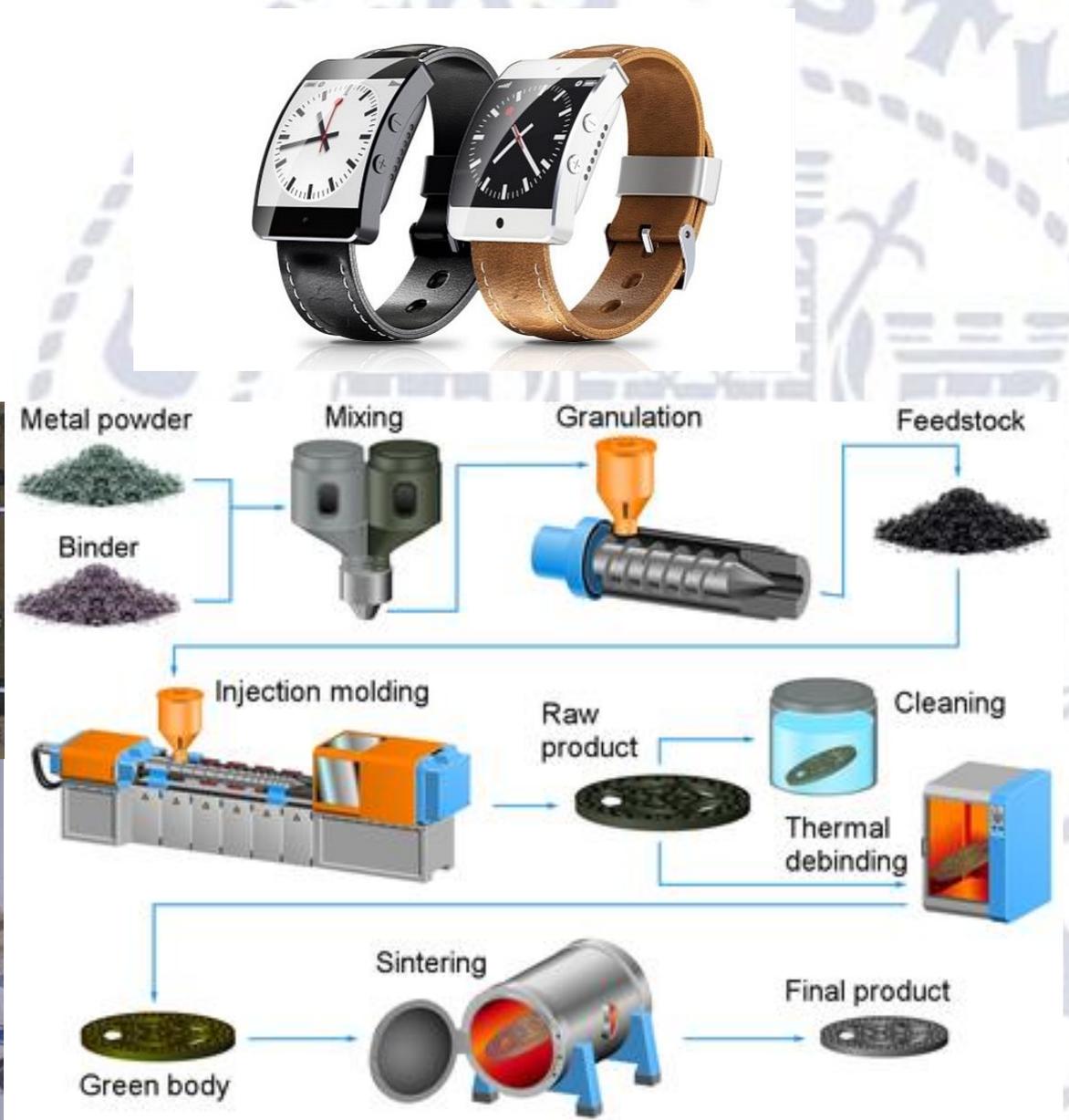


# Varianti dello stampaggio ad iniezione

- ▶ materiali diversi (es. spazzolino da denti)
- ▶ colori diversi
- ▶ inserti (es. cacciavite)
- ▶ iniezione compressione (CD)



- ▶ MIM (metal injection moulding),  
polimero + polveri M (es. swatch irony)

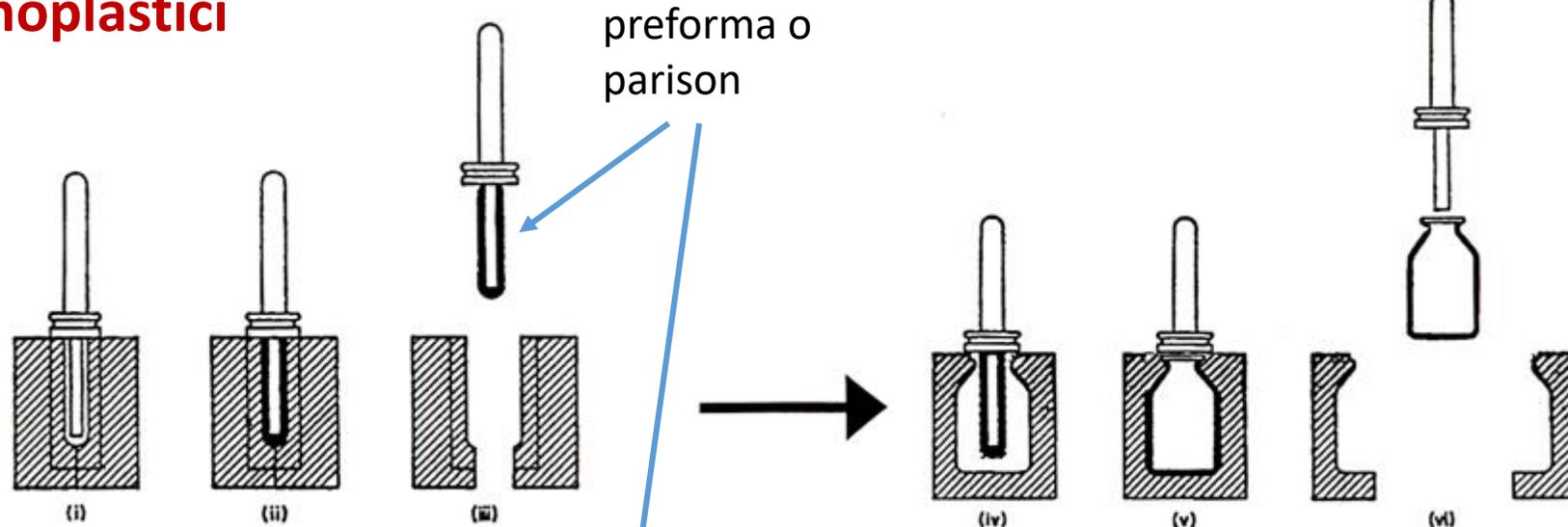


# Iniezione per termoindurenti

- Alimentazione: granuli di 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)

# Stampaggio per SOFFIATURA (blow moulding)

per termoplastici



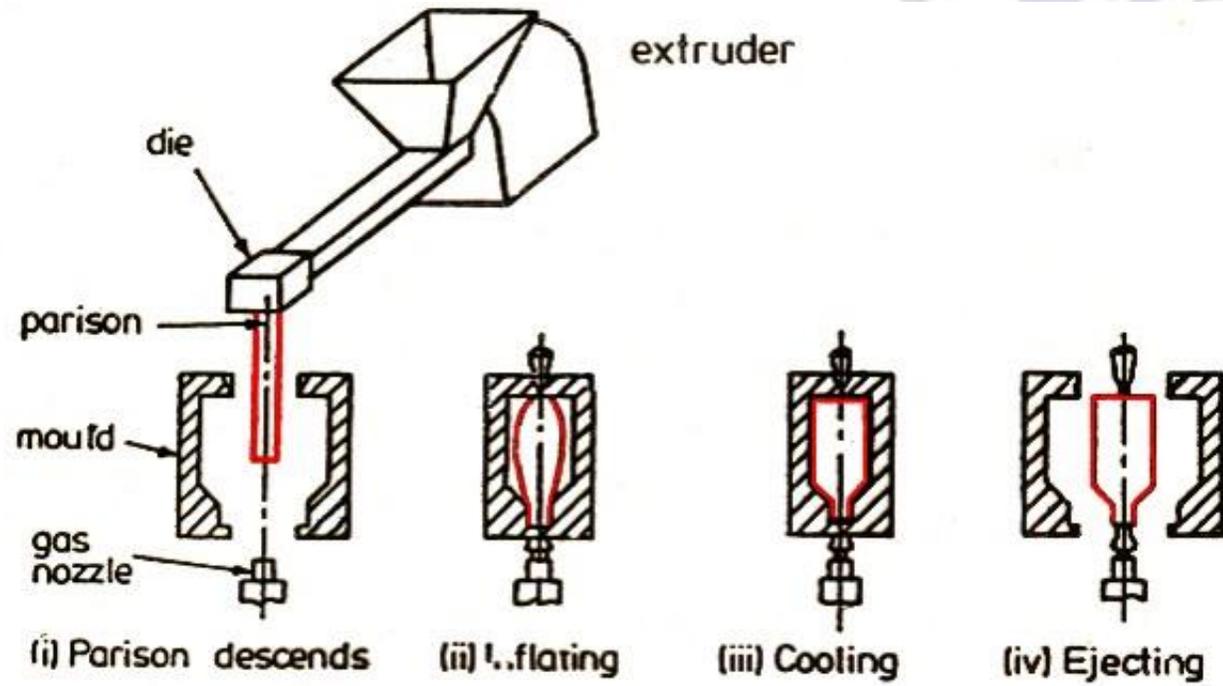
ciclo d'iniezione: 20s

ciclo di soffiaggio: 7s



vantaggi:

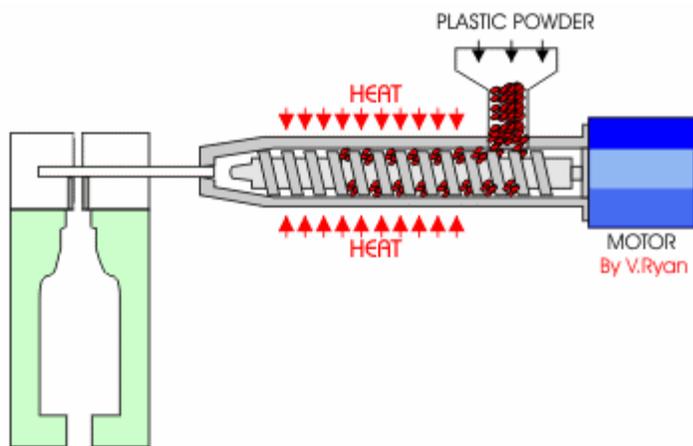
- ▶ controllo spessore
- ▶ forme complesse



- ▶ estrusione attraverso ugello anulare
- ▶ estruso inserito in stampo
- ▶ soffiaggio con getto di gas

il semilavorato cavo (parison) appena fuori l'estrusore collassa e si deforma

⇒ difficile controllo dello spessore



**BPF** **Extrusion Blow Moulding** **RPC GROUP PLC**

hopper

electric motor

screw

heater elements

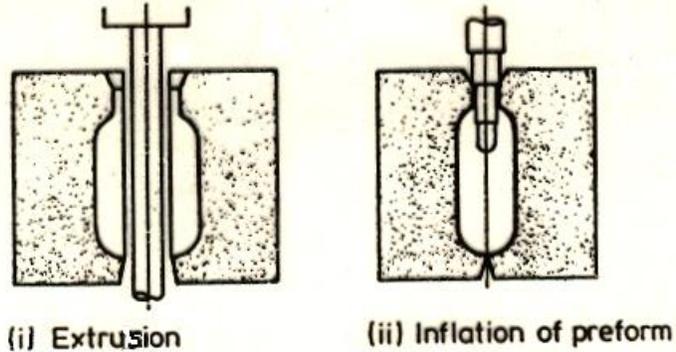
hot knife

air hose

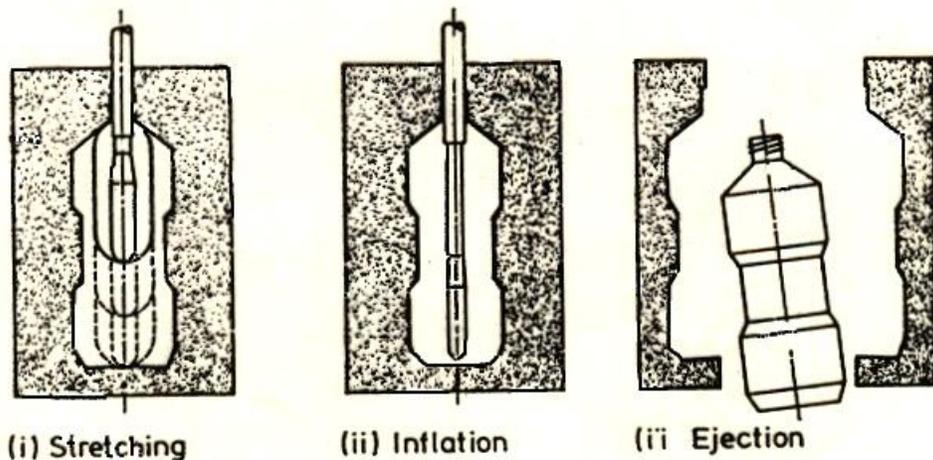
**Stages**

- 1 The hot plastic extruded into the mould in pipe form.
- 2 While still hot, the plastic is trapped in the mould, a hot knife cuts it off at the top and it is also pinched at the bottom.
- 3 The mould then moves to the right. An air hose is inserted into the top.
- 4 The plastic in the mould expands to fill the mould.
- 5 The mould then separates, which releases the plastic (bottle).

# Estrusione / Iniezione e stiro (extrusion/injection stretch blow moulding)



(a) Manufacture of preform



(b) Manufacture of bottle

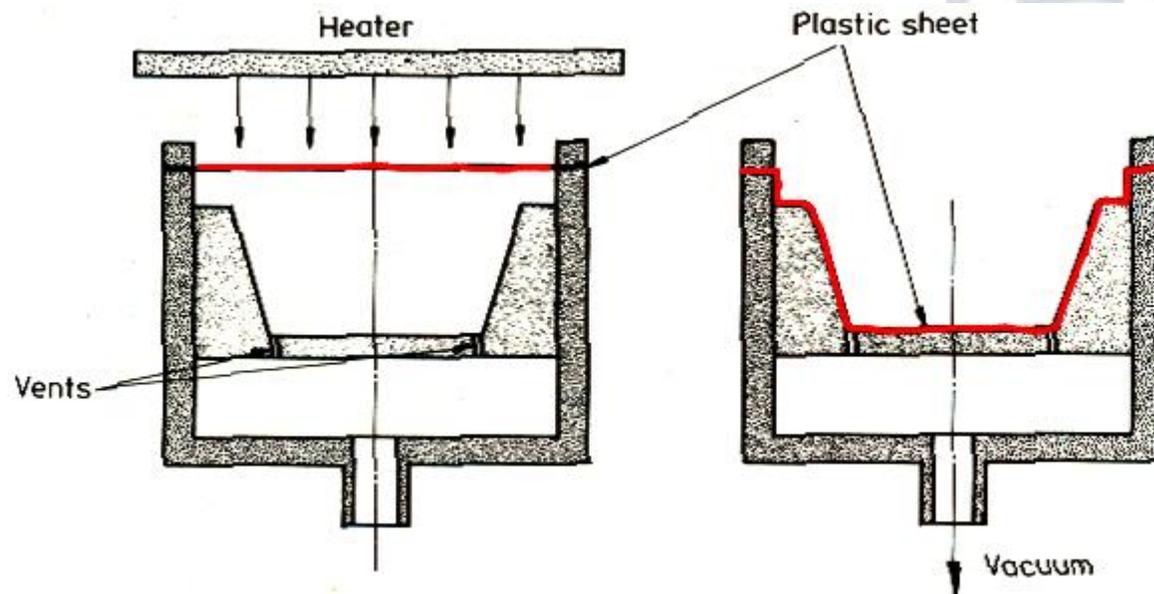
permette di produrre forme con orientazione biassiale

# FORMATURA A CALDO

## per termoplastici

Si sfrutta la malleabilità del termoplastico riscaldato

### Sistema a vuoto



Stampo negativo  
(femmina)

varianti:

- controstampo positivo (maschio)
- su stampo positivo (maschio)

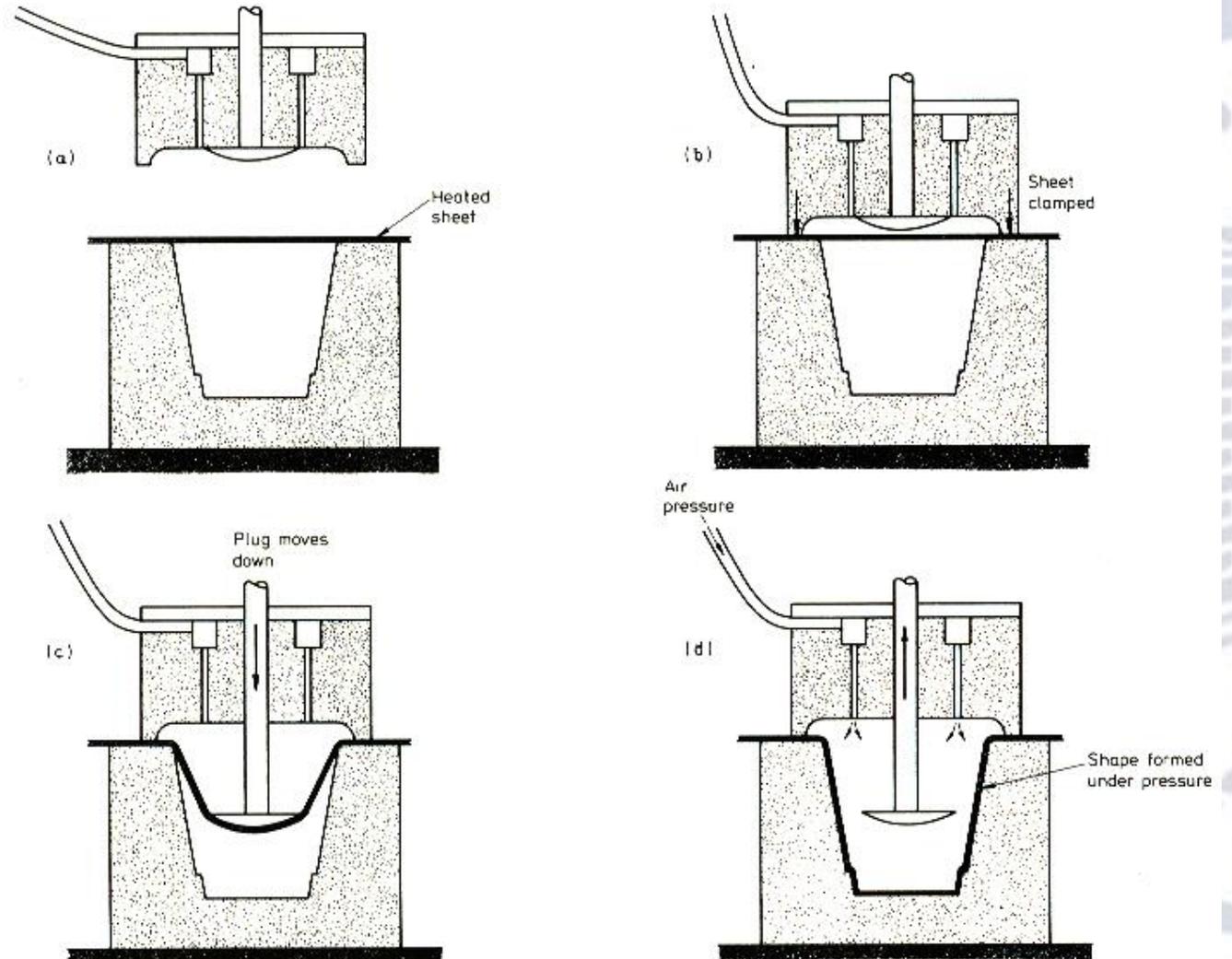
## Sistema a pressione

### problemi:

determinazione dello spessore, lo stampo è freddo!!!!

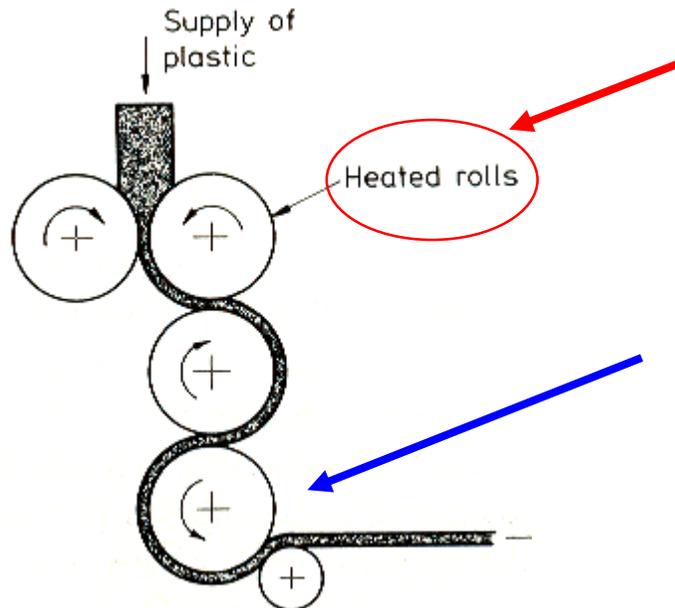
Applicazioni: paraurti parti di  
frigoriferi parafanghi moto

...



# CALANDRATURA

## per termoplastici ed elastomeri



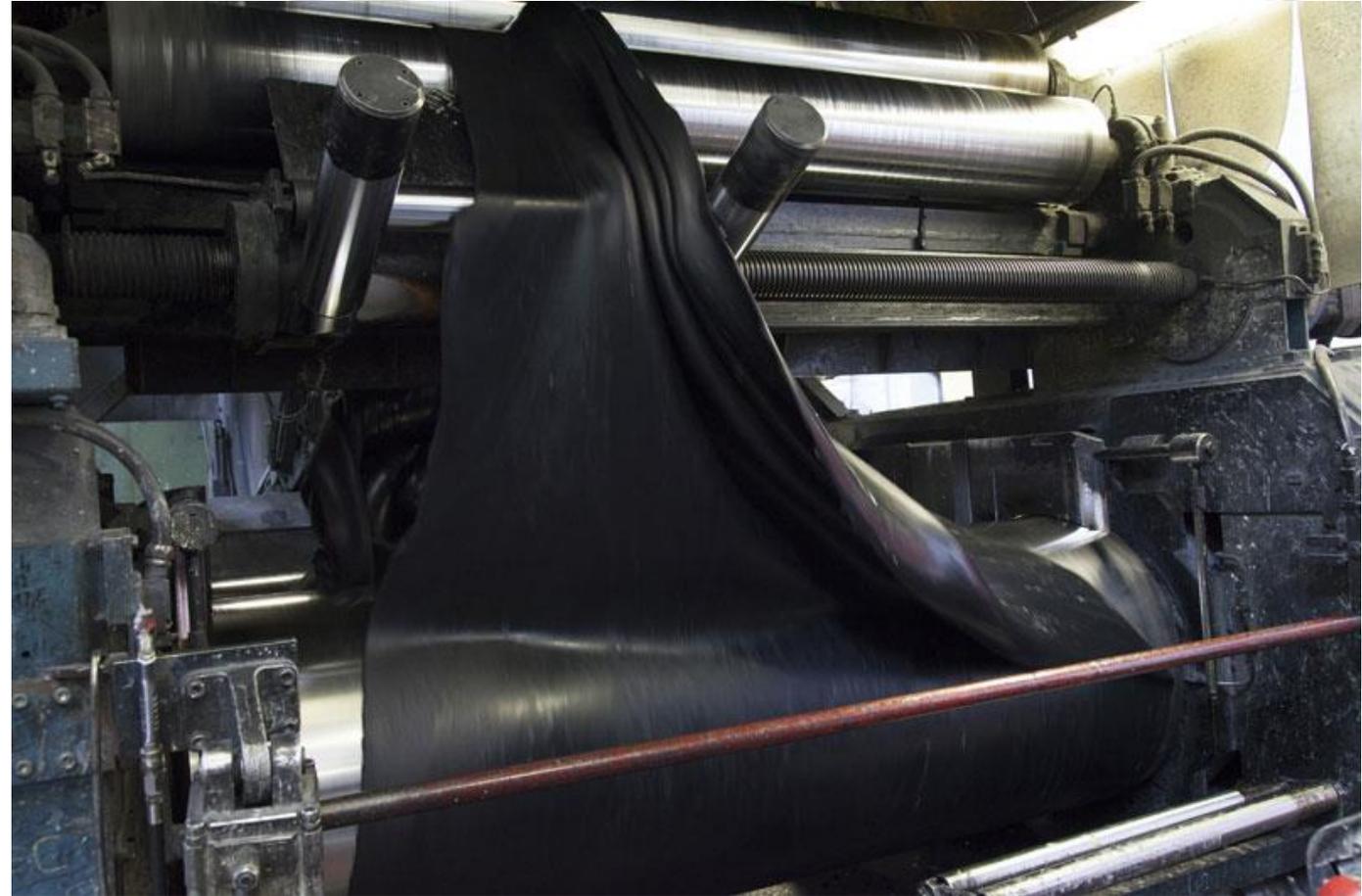
I fogli di gomma devono essere successivamente reticolati in camera calda (*vulcanizzazione*). Spesso vengono lasciati allo stato *verde* per successive operazioni di formatura

Per produrre film e lastre

Inizialmente nato per mescolare additivi alla gomma

- ! controllo di T nei primi due cilindri (200°C)
- velocità variabili tra 0.1-2 m/s, in funzione dello spessore voluto
- ottima accuratezza di spessore ( $\pm 0.005$  mm)
- !! produzione accurata dei rulli!!
- OK per polimeri sensibili a degrado termico (PVC)

Inizialmente nato per mescolare additivi alla gomma



## Finta pelle in PVC

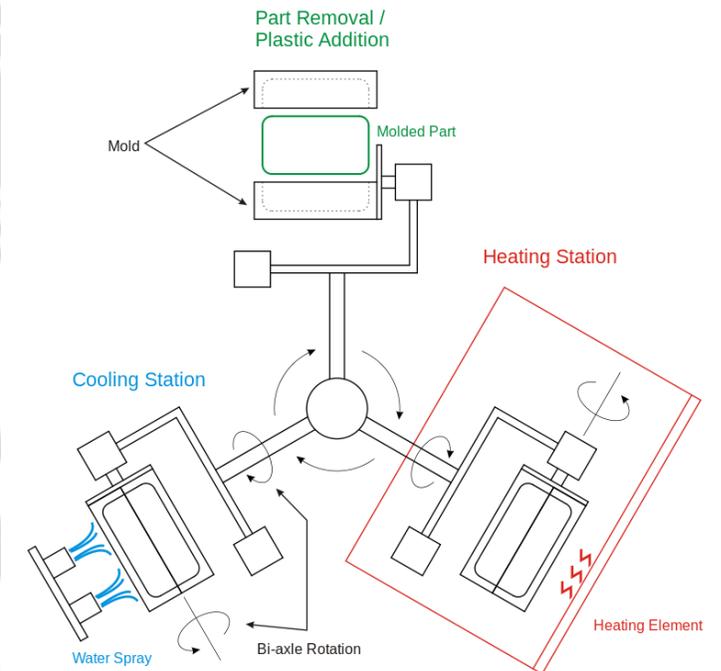
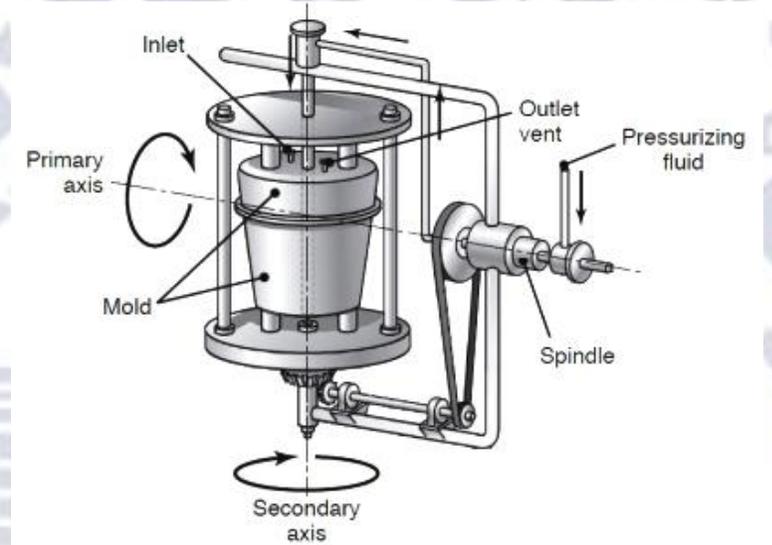


# Stampaggio per ROTAZIONE

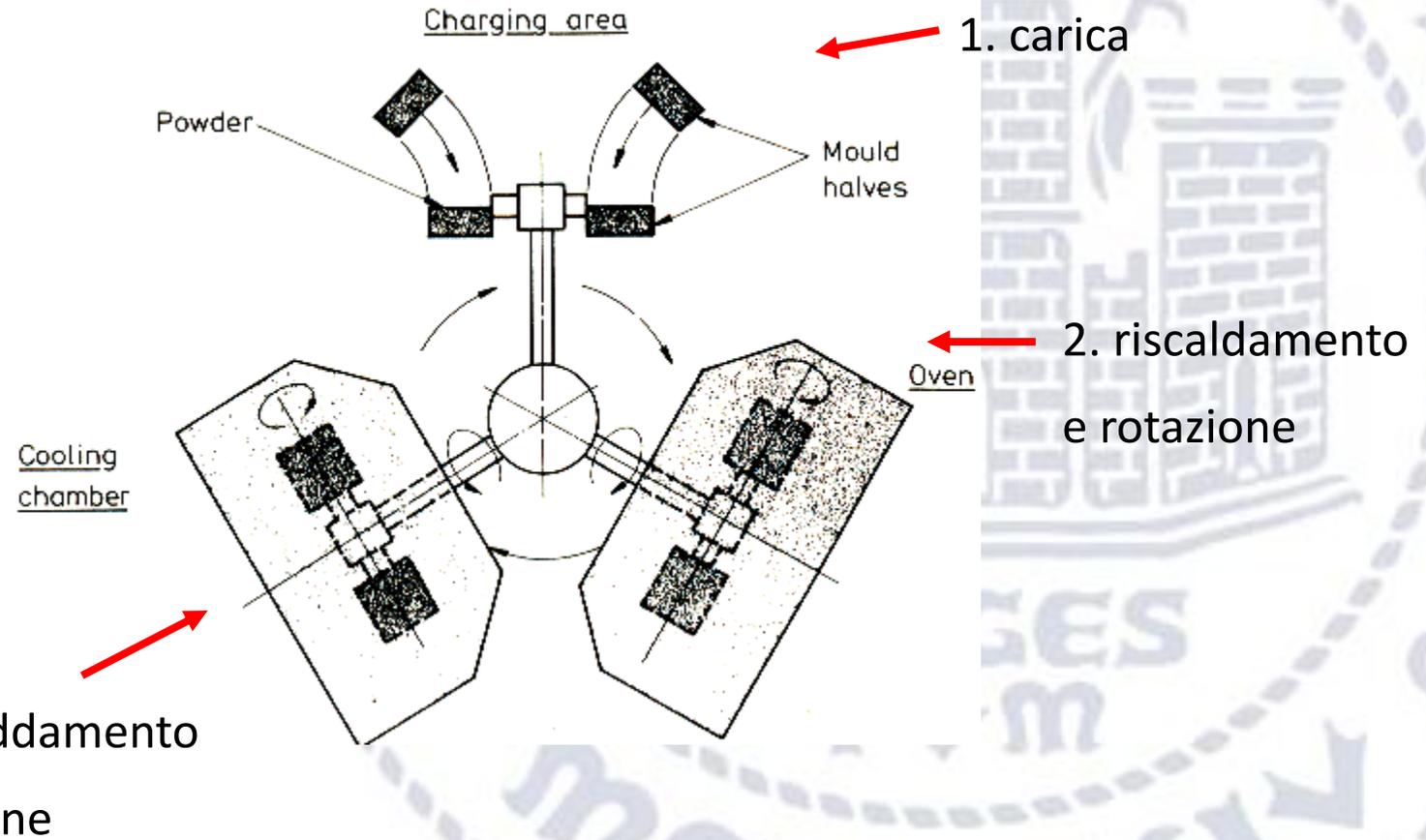
## per termoplastici

Per produrre grandi articoli cavi

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



Generalmente il sistema è composto di tre bracci:



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



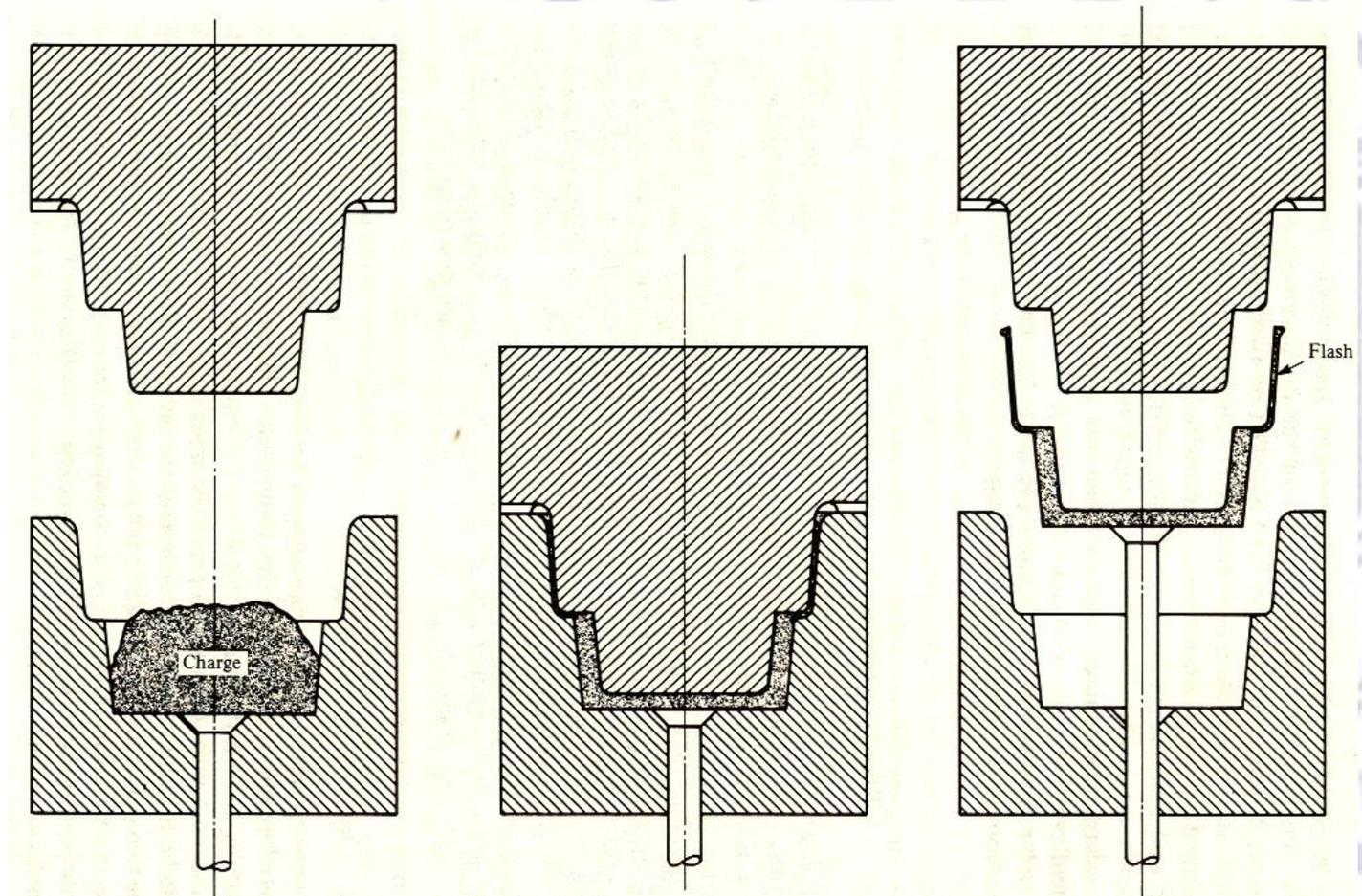
# Stampaggio per COMPRESSIONE

Principalmente per  
termoindurenti, ma anche per  
termoplastici e elastomeri

stampo e controstampo **riscaldati**

→  $T = 130-200^{\circ}\text{C}$

pressione →  $P = 7 - 25 \text{ MPa}$



# Stampaggio per TRASFERIMENTO RTM (transfer moulding)

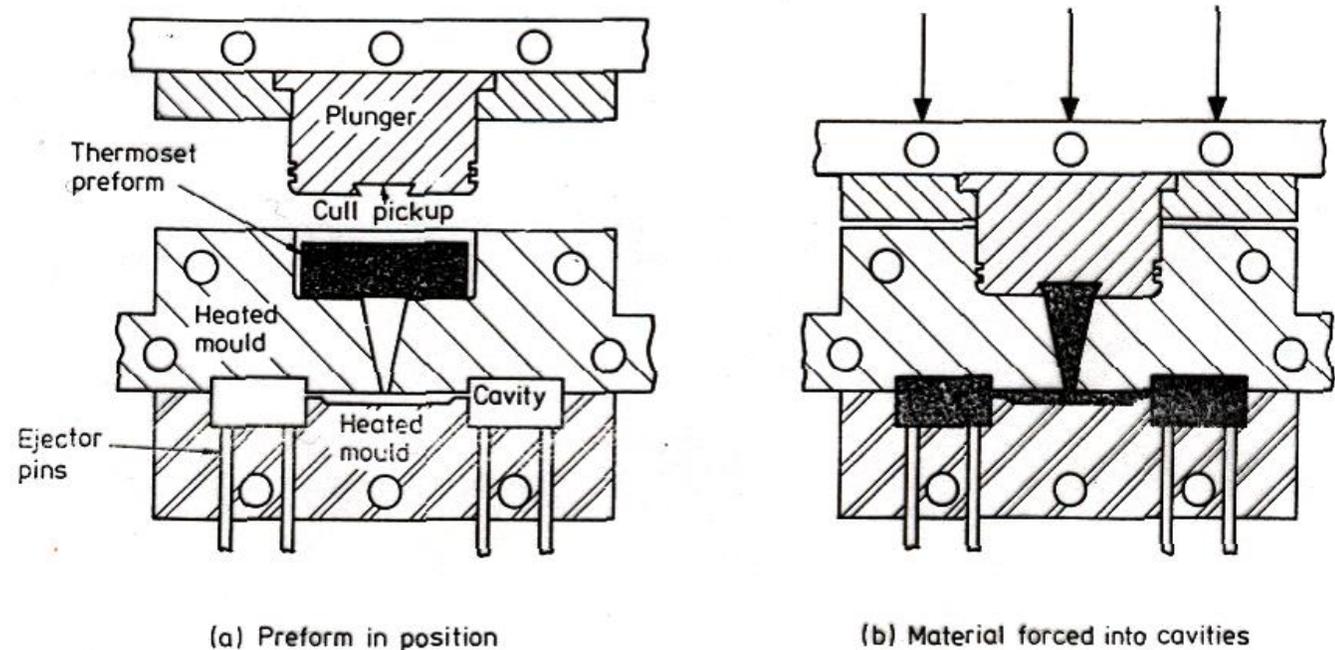
Principalmente per termoindurenti e gomme

simile a stampaggio per compressione, ma

- ▶ compressione in camera separata
- ▶ iniezione nello stampo (spesso a multicavità)

Vantaggi:

- migliore distribuzione di T  $\Rightarrow$  accelerazione della cura
- ciclo più corto
  - ▶ stampo riscaldato a 150 – 200°C per la cura
  - ▶ stampi in acciaio



# Rapid prototyping (RP) – 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*

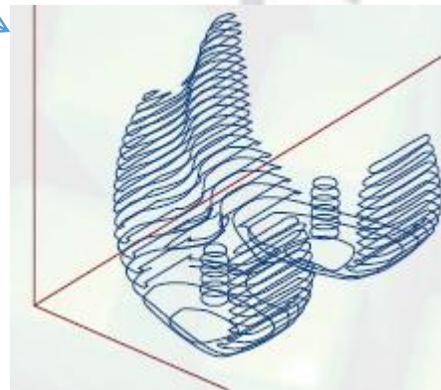
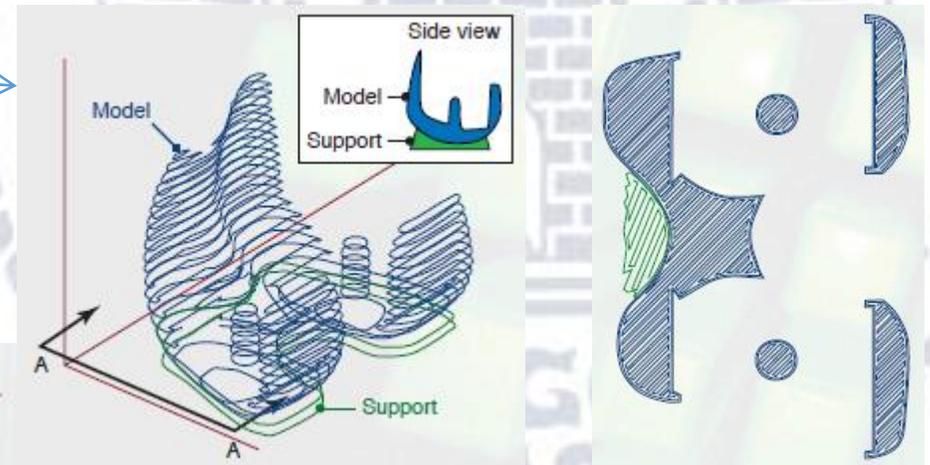
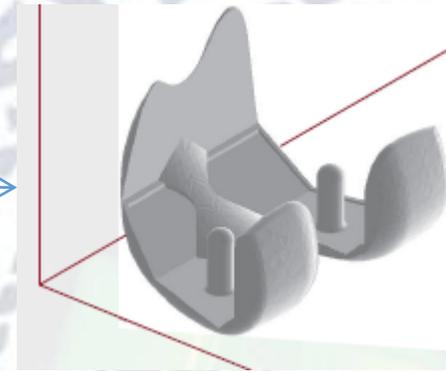
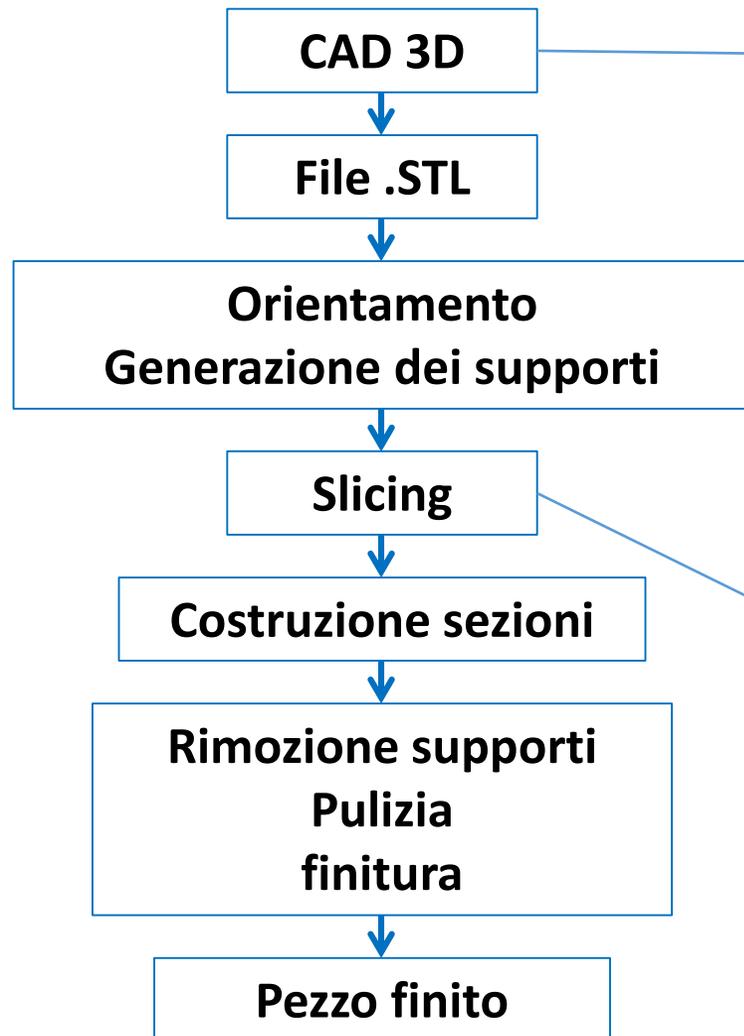
# Tecnologie RP

La stampante 3D legge i dati dal disegno CAD (formato .STL)

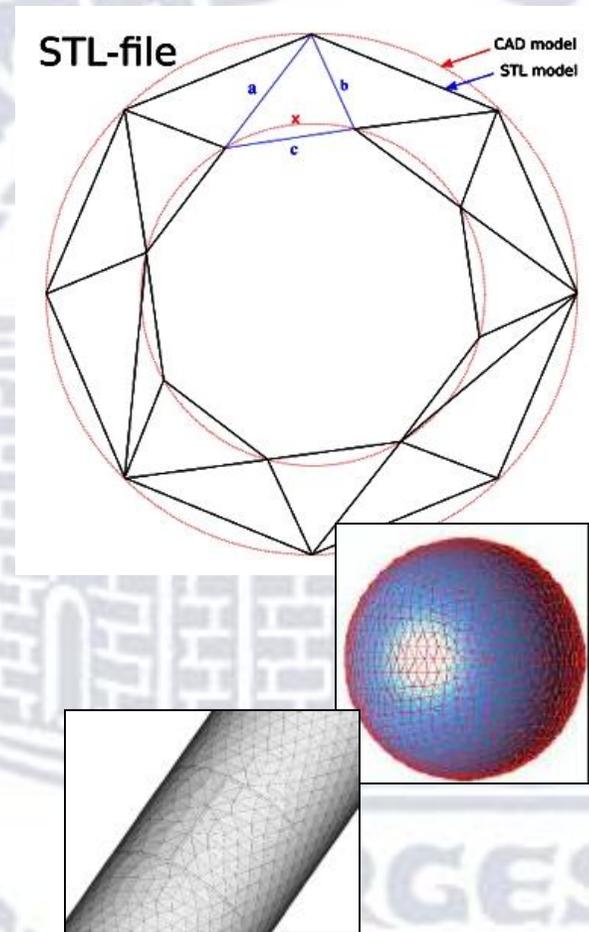
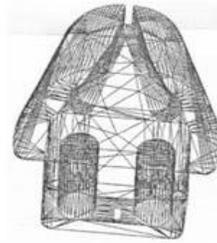
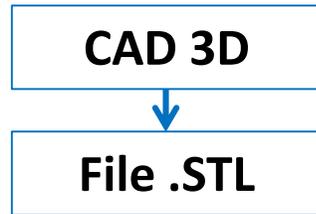
→ stende strati successivi di materiale **liquido**, in **polvere** o in **fogli**, formando il modello fisico con una serie di *sezioni trasversali*.

Gli strati (layer) che corrispondono alla sezione trasversale virtuale del modello CAD sono uniti automaticamente per creare la forma finale

# Le fasi del ciclo di RP



sez. AA



**.STL** (*STereo Lithography interface format*) : formato grafico standard utilizzato nelle tecnologie RP

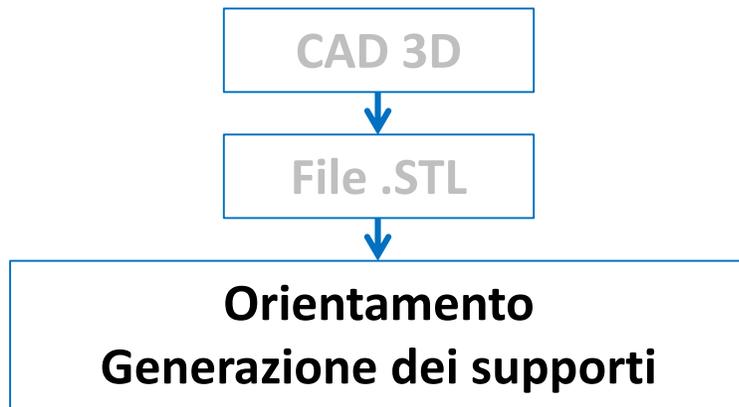
→ Rappresentazione semplificata delle superfici interne ed esterne del pezzo tramite *facette triangolari* che per definizione sono piane.

Ciò introduce un errore noto come *facetting*.

L'effetto può essere contenuto aumentando il numero di triangoli; appesantendo, però il tempo necessario all'elaborazione del file STL.

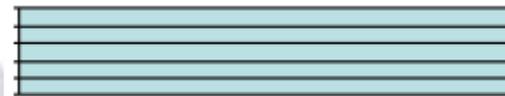
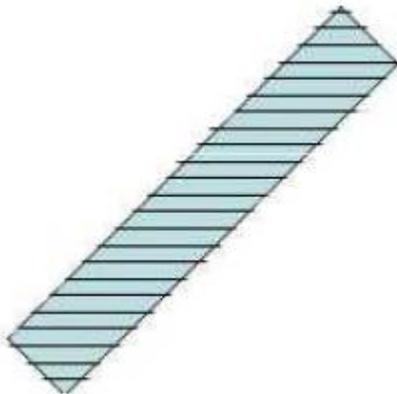
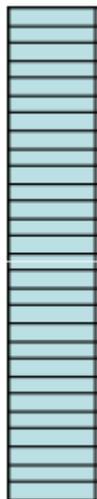
*acronimi diversi per STL:*

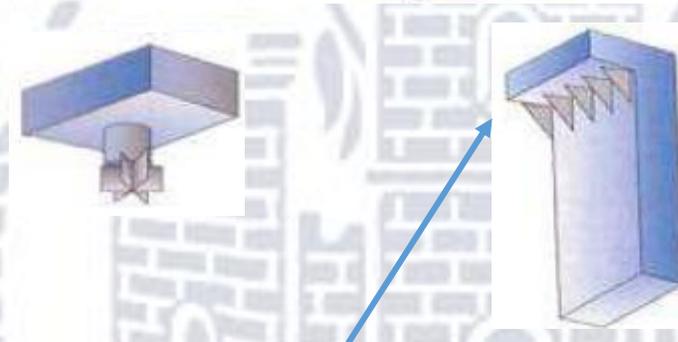
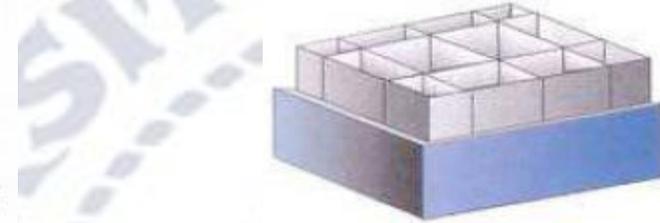
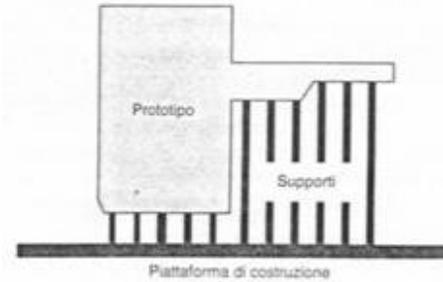
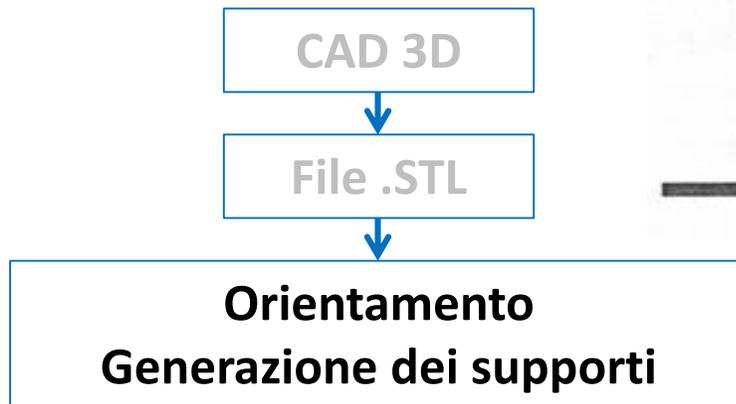
*"Standard Triangle Language" o "Standard Tessellation Language" o "Solid To Layer"*



Orientamento: importante sia per la rugosità superficiale sia per ridurre i tempi macchina

Oggetto da realizzare

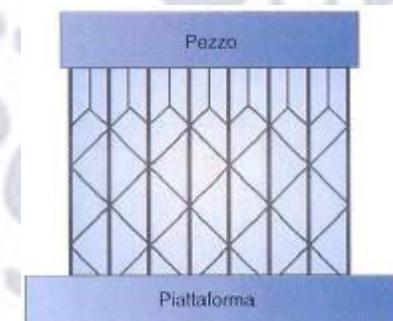


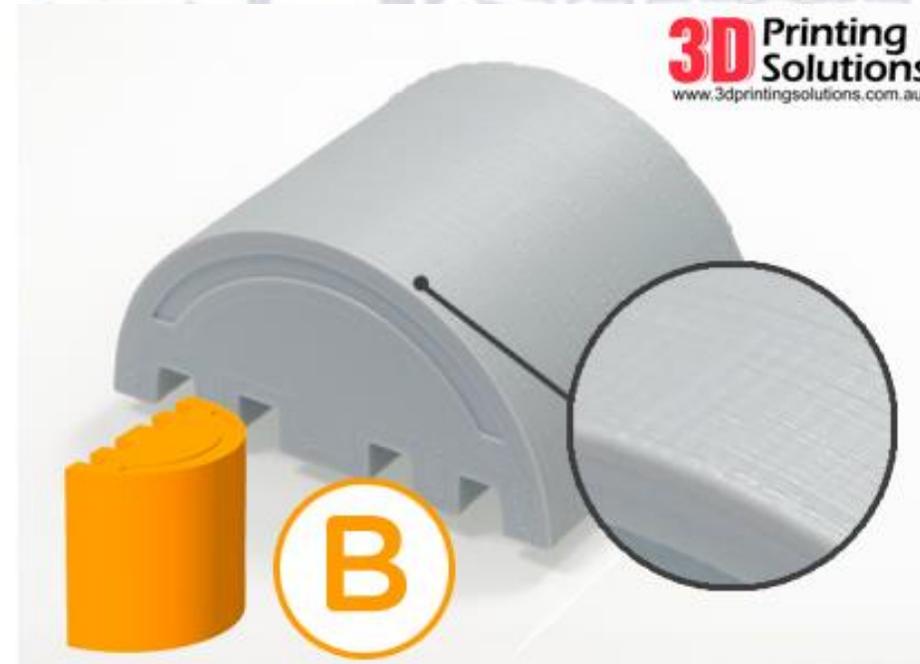
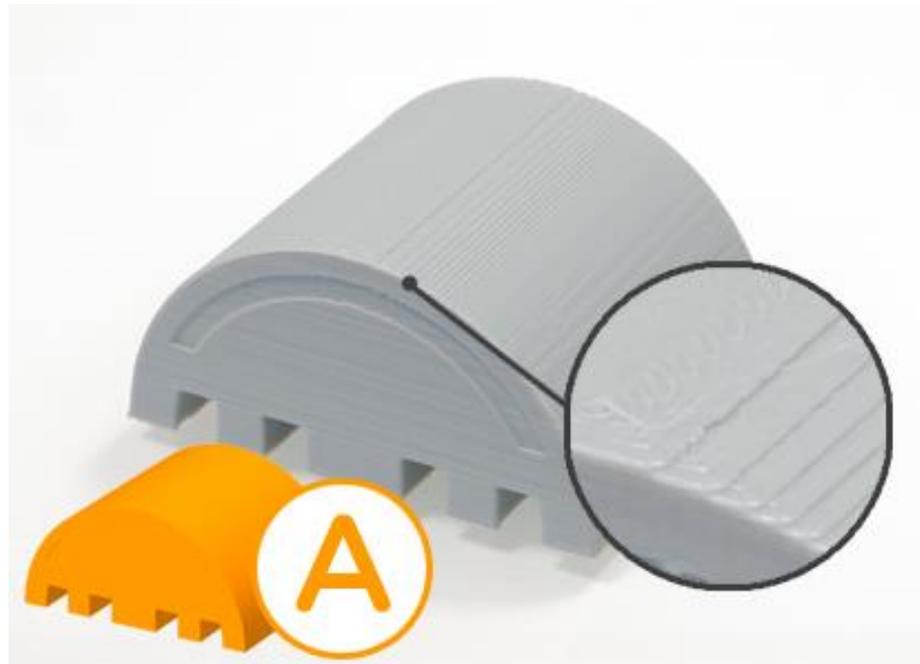
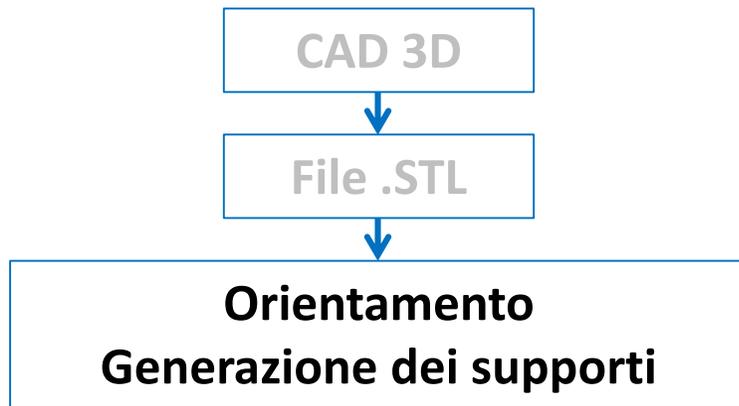


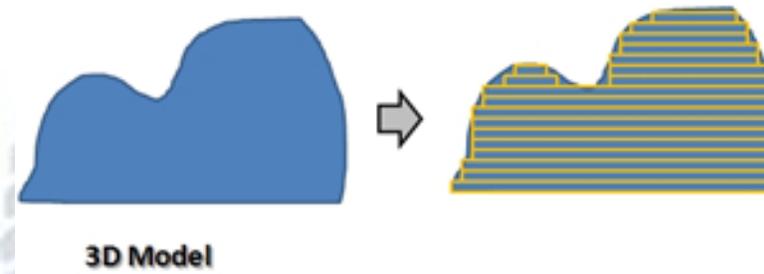
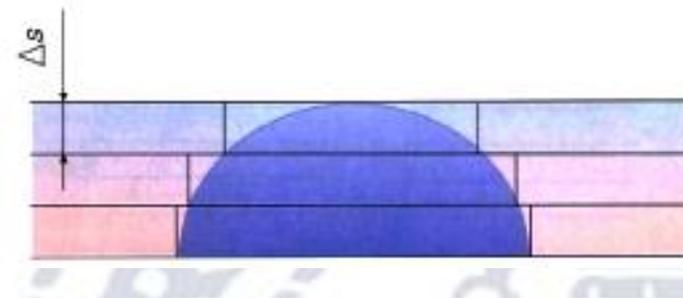
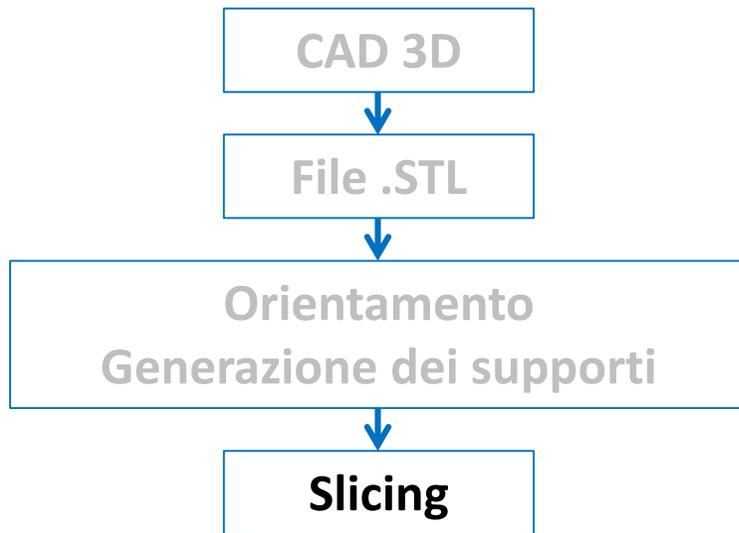
### Generazione dei supporti

Operazione necessaria per alcune tecniche, per sostenere le parti sporgenti del pezzo.

- evitano fenomeni di distorsione (ad es. *curl distortion*)
- evitano l'ancoraggio diretto sull'elevatore che renderebbe difficoltosa la rimozione del modello
- devono essere robusti per sostenere il peso
- facilmente identificabili ed asportabili
- devono richiedere un consumo ridotto di resina



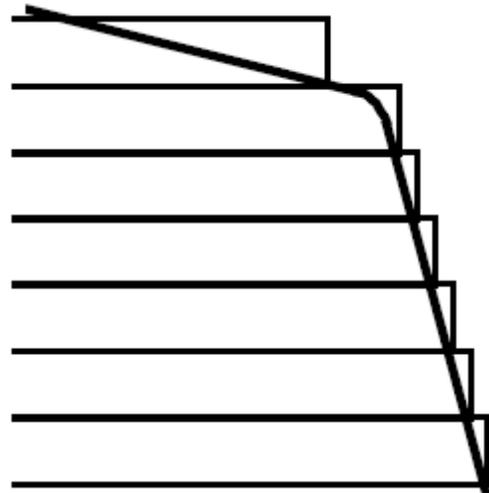




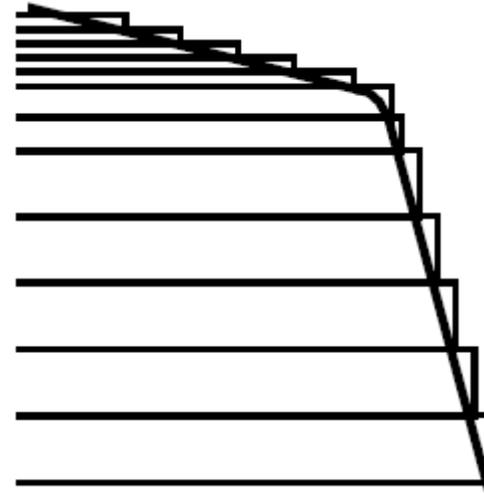
Operazione comune a tutte le tecnologie e che consiste nell'intersezione del modello completo di supporti con una serie di piani la cui normale è parallela alla direzione di costruzione STL per ottenere le singole sezioni che distano di una distanza  $\Delta s$  variabile tra 0,05 e 0,5mm.



Lo slicing è una operazione critica perché determina le caratteristiche superficiali dell'oggetto finito. Questa operazione può essere di tipo **costante** oppure **adattativo** quando lo spessore delle slice (*fette*) è variabile e lo si sceglie in funzione della curvatura della superficie al fine di adattare meglio la geometria finale, riducendo l'effetto *a gradino*.



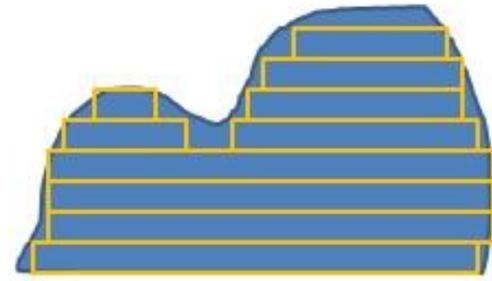
**costante**



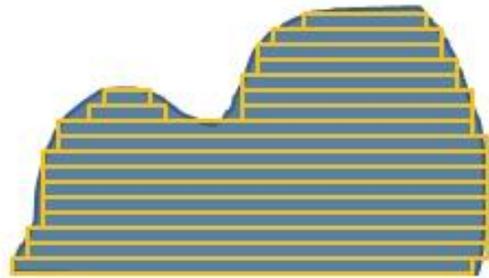
**adattivo**



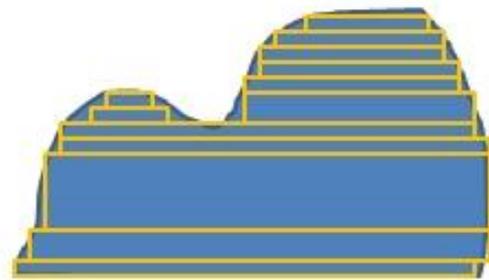
3D Model



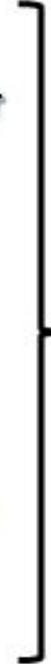
large layer thickness



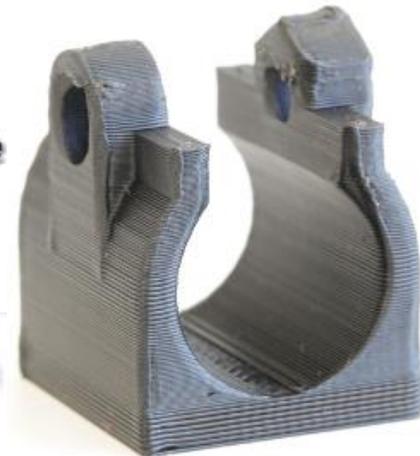
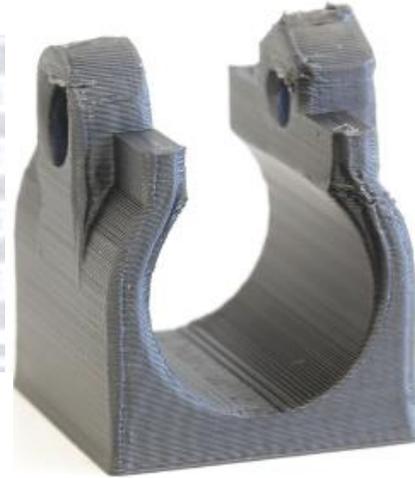
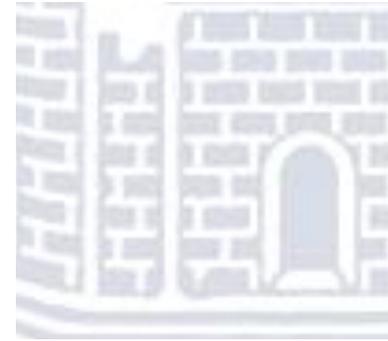
fine layer thickness

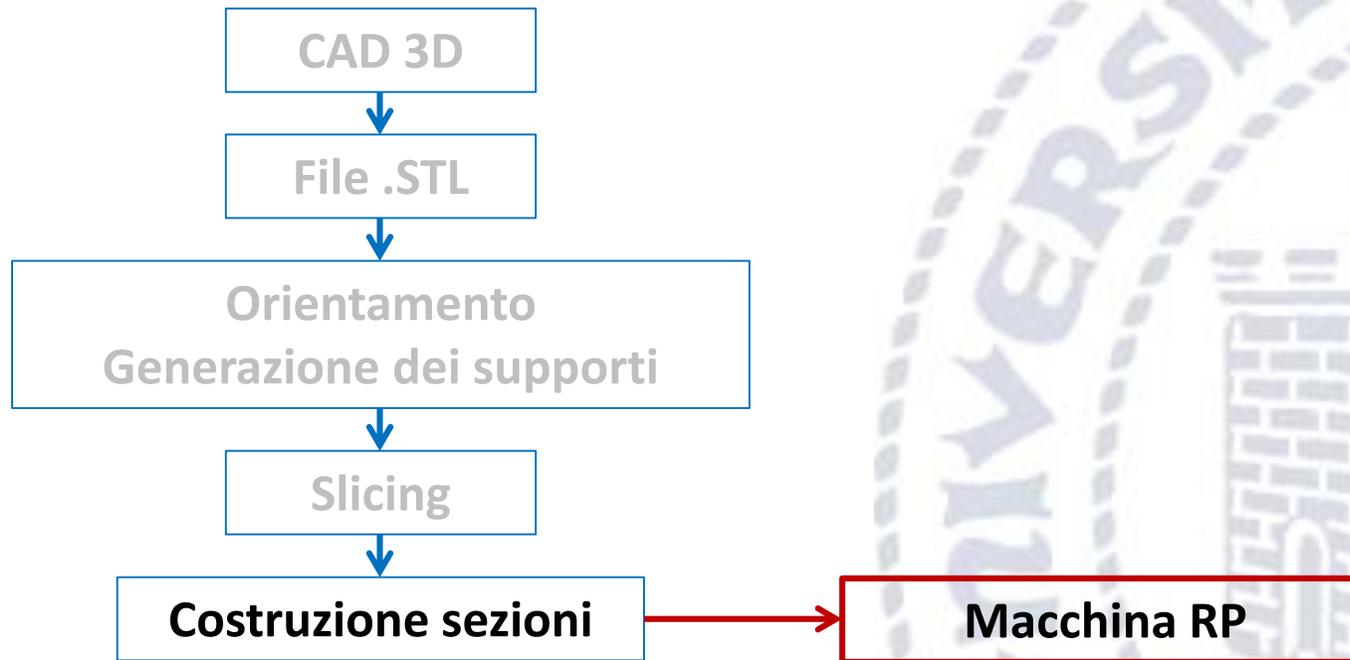


Adaptive slicing



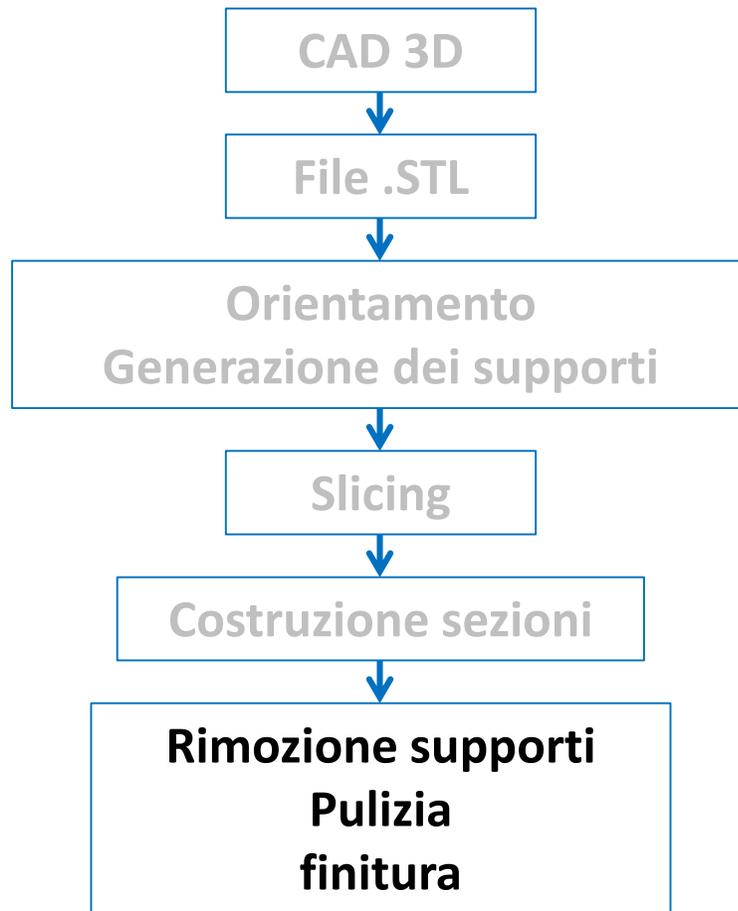
Normal slicing





Invio alla macchina il file STL o le slice, a seconda del modello di prototipatrice,  
⇒ si procede con la deposizione del materiale strato per strato fino ad arrivare all'oggetto finale.

Questa fase può durare alcune ore in funzione delle dimensioni dell'oggetto in particolare dell'altezza, pertanto un'accurata scelta dell'orientazione è importante sia per la finitura superficiale sia per ridurre i tempi macchina.



### Operazioni manuali:

- togliere l'oggetto stampato dalla macchina
- liberarlo dal supporto
- liberarlo dal materiale in eccesso
- ulteriori finiture: rimuovere il prototipo dalle polveri in eccesso, nel caso della tecnica *PolyJET* si ricorre a un'idropulitrice che rimuove il liquido di supporto.

In altri casi si può procedere a un miglioramento delle superfici ricorrendo a trattamenti superficiali quali l'impiego di carta abrasiva o verniciatura.

# Tecnologie RP

La stampante 3D

- legge i dati dal disegno CAD (formato .STL)
- stende strati successivi di materiale

liquido, in polvere o in fogli

⇒ il pezzo si forma con una serie di sezioni trasversali

## Tecnologie RP

<i>Fase</i>	<i>Processo</i>	<i>Principio</i>	<i>Processo di solidificazione</i>	<i>materiali</i>
liquida	SLA	cura	fotopolimerizzazione	Fotopolimeri (acrilati, epoxy)
	PolyJet	cura	fotopolimerizzazione	Termoplastici (ABS, PC, PS)
polvere	3D print	Legante tra strati di polvere		Polimeri, ceramici e metalli con legante
	SLS	laser	Sinterizzazione o fusione	Polimeri, metalli e ceramici con legante
	...			

# Tecnologie RP

- Stereolitography (SLA)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Litografia ottica o Solid Ground Curing (SGC)
- Fused Deposition Modeling (FDM)
- 3D/Inkjet Printing (3DP)
- Poly-Jet
- Multi-jet modeling (MJM)

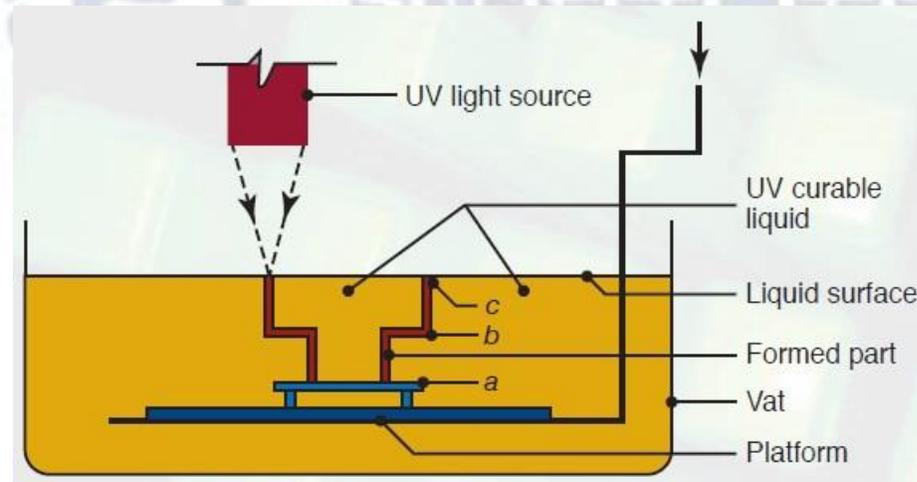
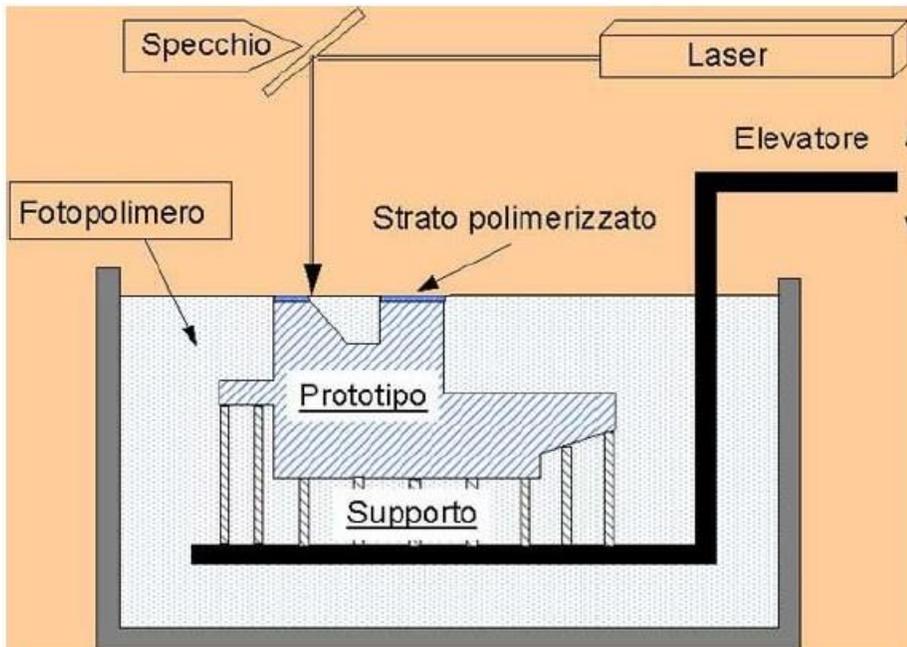
- **Stereolithography (SLA)**

primo sistema di RP  
commercialmente disponibile

Fotopolimerizzazione di **resina liquida** con UV // fotopolimeri

- Applicazioni: prototipi concettuali, modelli per applicazioni fusorie

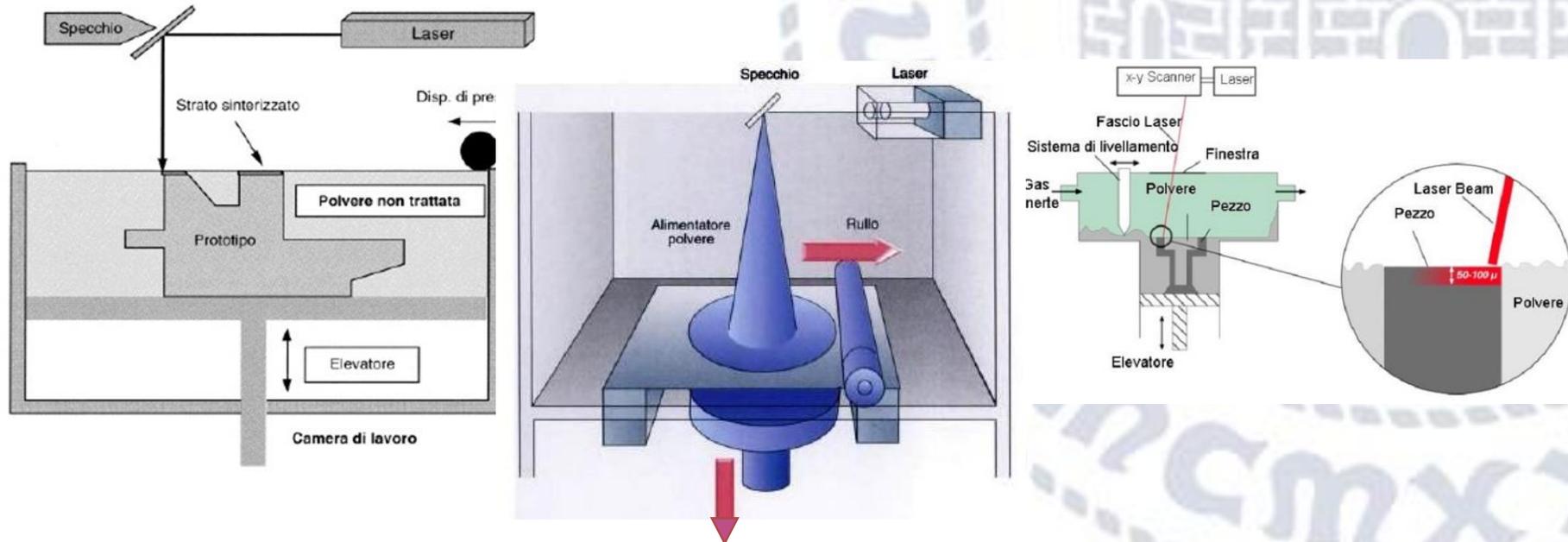
Il prodotto (**green part**) contiene ancora del liquido intrappolato ⇒ esposizione ad una lampada UV → **red part**



- **Selective Laser Sintering (SLS)**

Fusione o sinterizzazione di **polveri** via laser CO<sub>2</sub> / la polvere fa da sostegno // termoplastici, metalli bassofondenti, sabbie

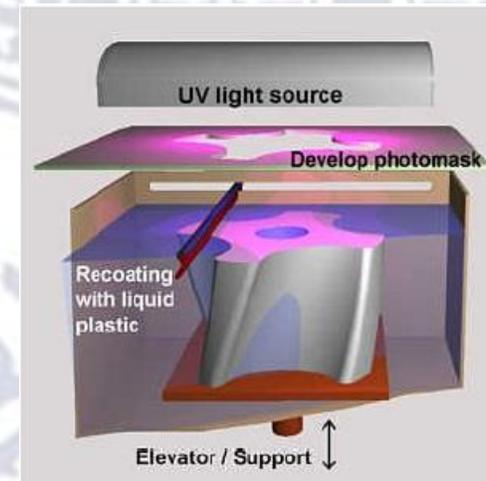
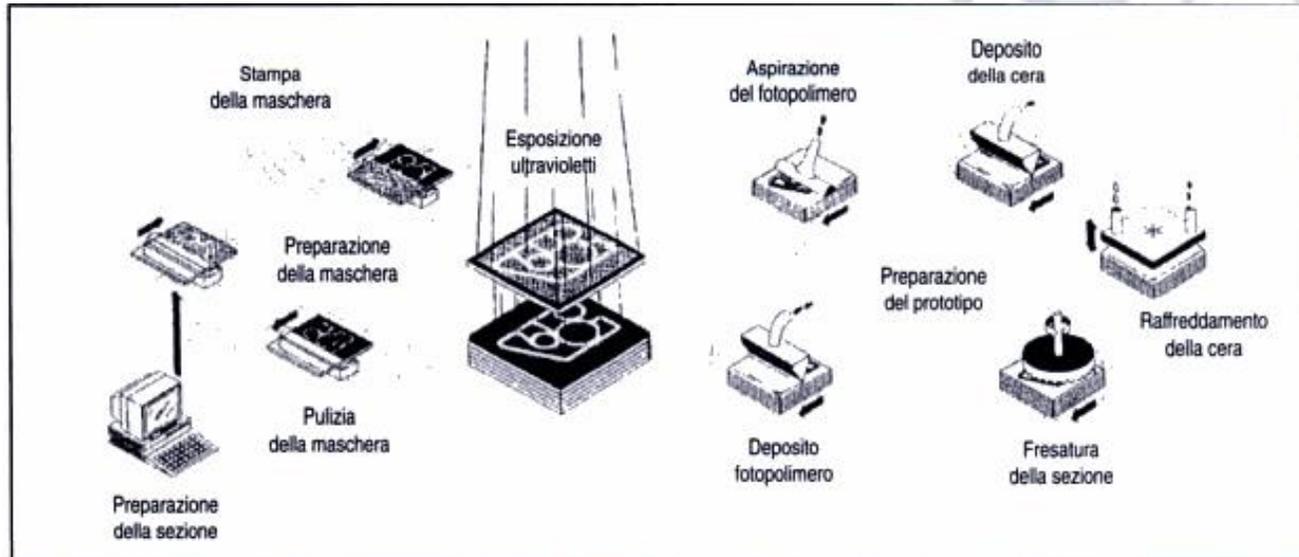
- Applicazioni: prototipi concettuali e funzionali, stampi, parti finali.



- **Litografia ottica o Solid Ground Curing (SGC)**

Fotopolimerizzazione di fotopolimero liquido via UV, luce proiettata attraverso un vetro su cui è impresso il negativo del layer / aspirazione di resina non polimerizzata  
→ deposizione di nuovo strato → UV → ...

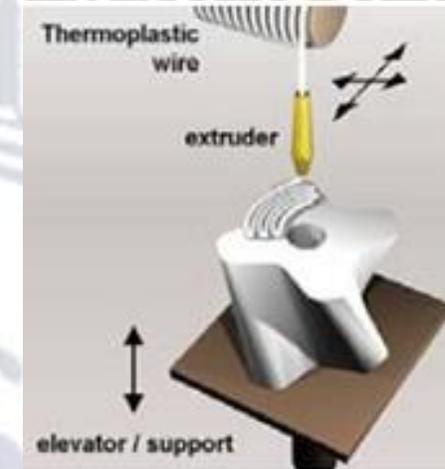
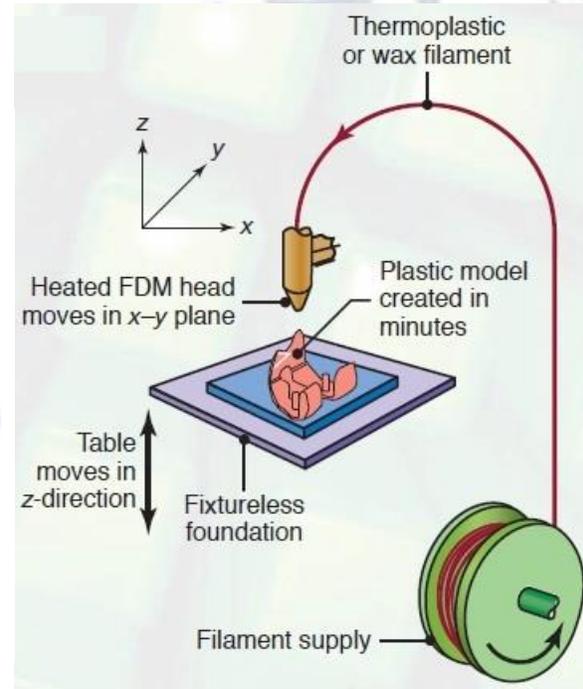
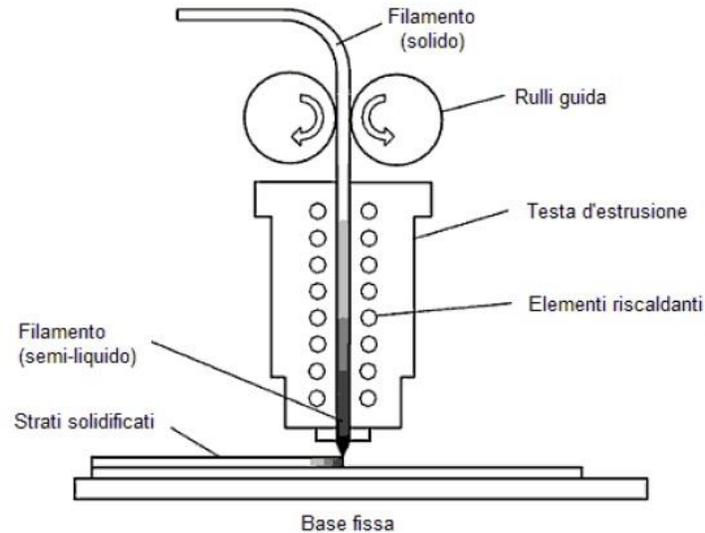
- Applicazioni: prototipi concettuali.



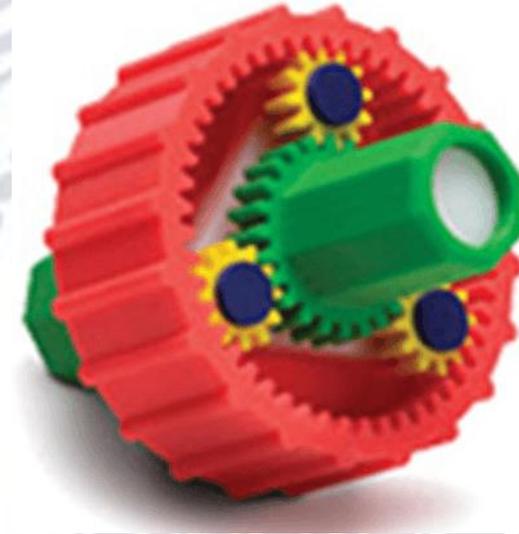
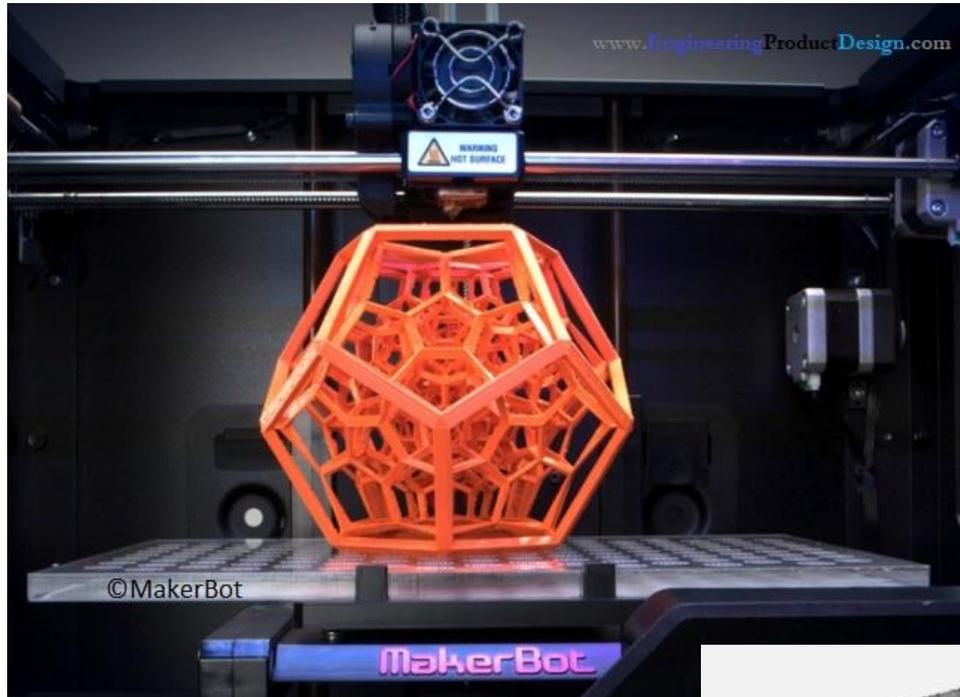
- **Fused Deposition Modeling (FDM)**

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

- Applicazioni: prototipi concettuali, funzionali, modelli in cera  
microfusione, parti finali



- Fused Deposition Modeling (FDM)

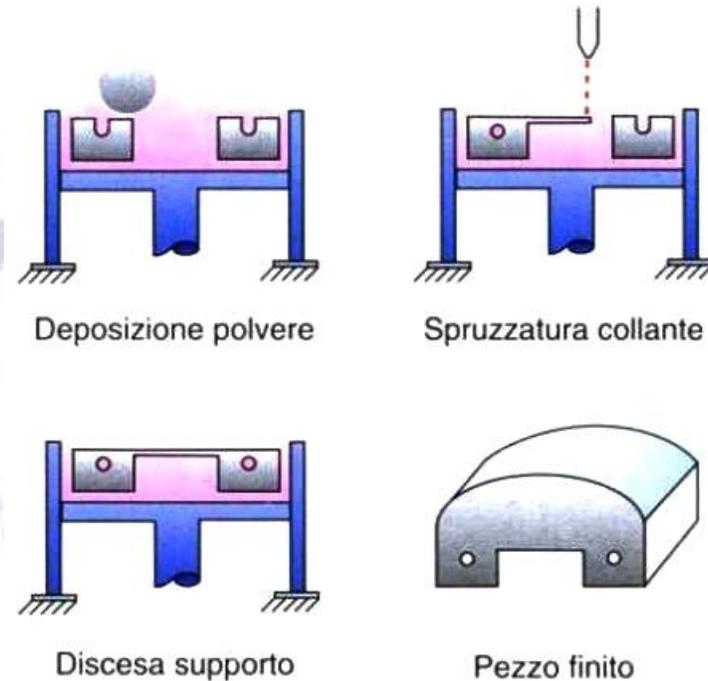
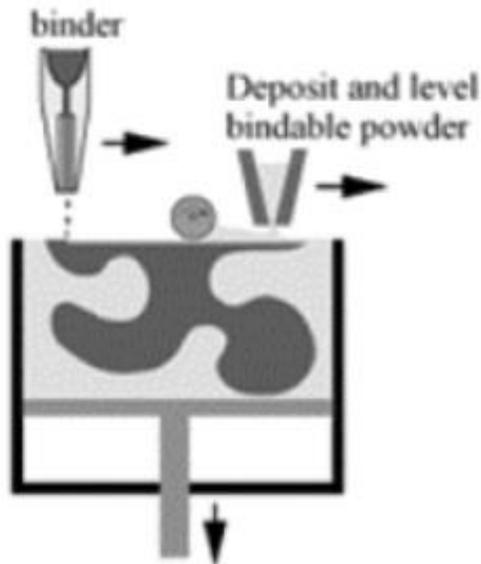


## • 3D/Inkjet Printing (3DP)

Spruzzatura di materiale legante sulla polvere del materiale da costruzione attraverso una testina mobile in modo da realizzare progressivamente il layer; può essere richiesto un successivo ciclo in forno

materiale legante: **termoplastici**, *farina*, *gesso* // la polvere fa da supporto (come in SLS)

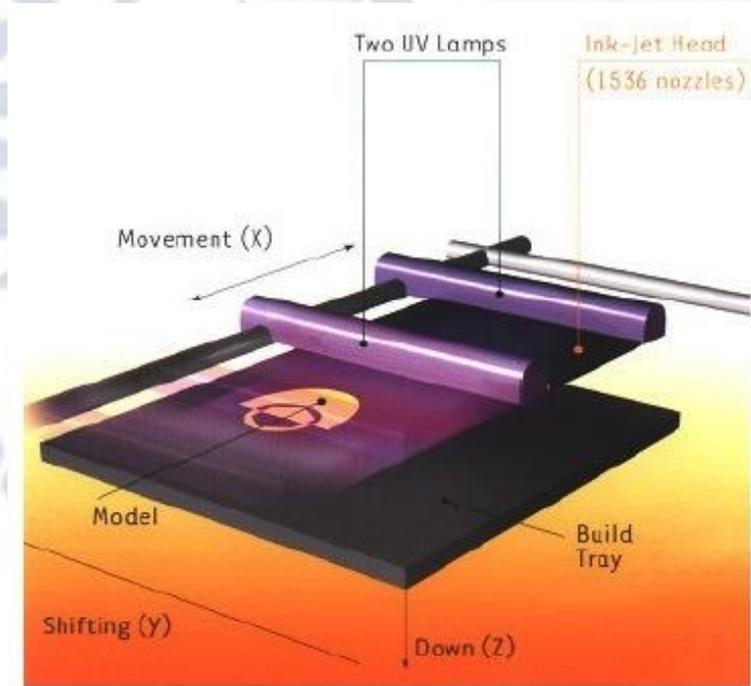
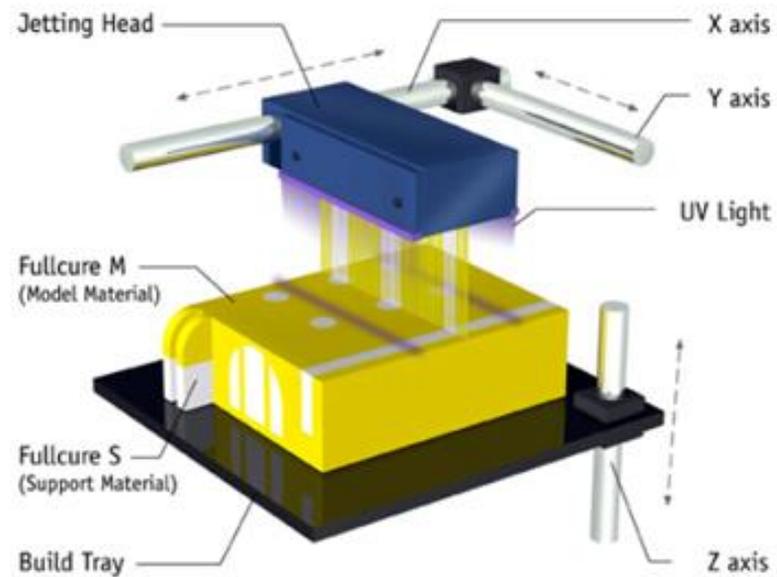
- Applicazioni: prototipi concettuali e funzionali



## • Poly-Jet

Fotopolimerizzazione di resina liquida con UV // [fotopolimeri](#)

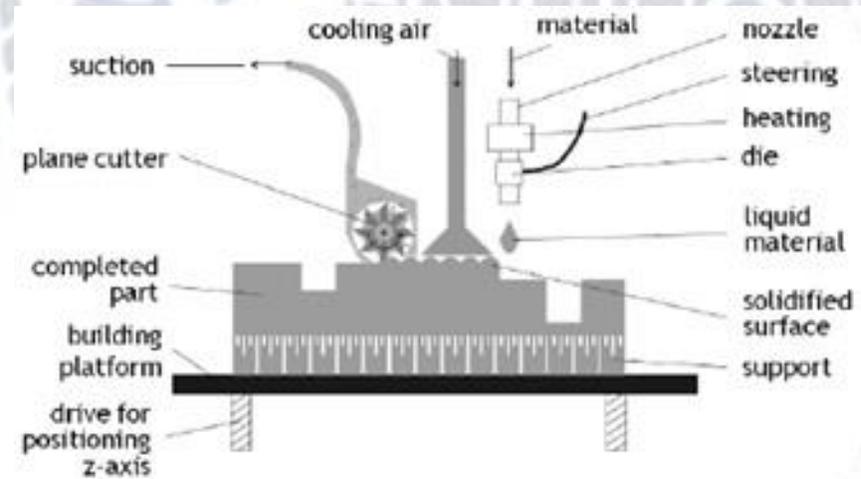
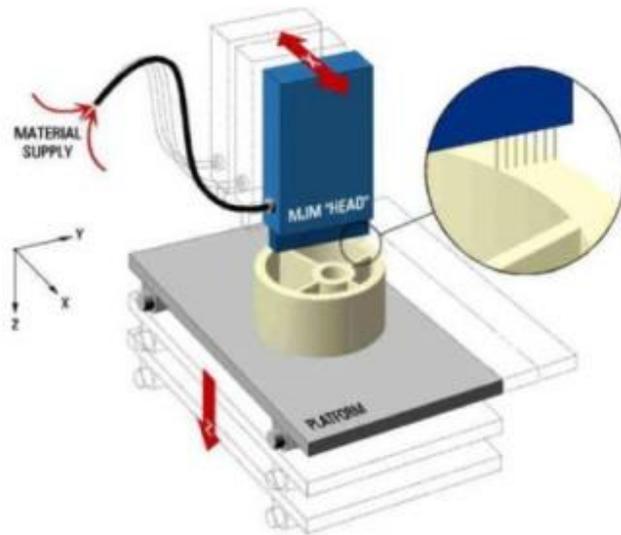
Stesso processo della tecnica 3DP, nella macchina sono inserite due cartucce, una contenente il fotopolimero destinato a costruire il pezzo e l'altra il materiale di supporto. Le testine si muovono nel piano X-Y e depositano il materiale in modo da costruire le sezioni, contemporaneamente una lampada UV polimerizza il materiale depositato.



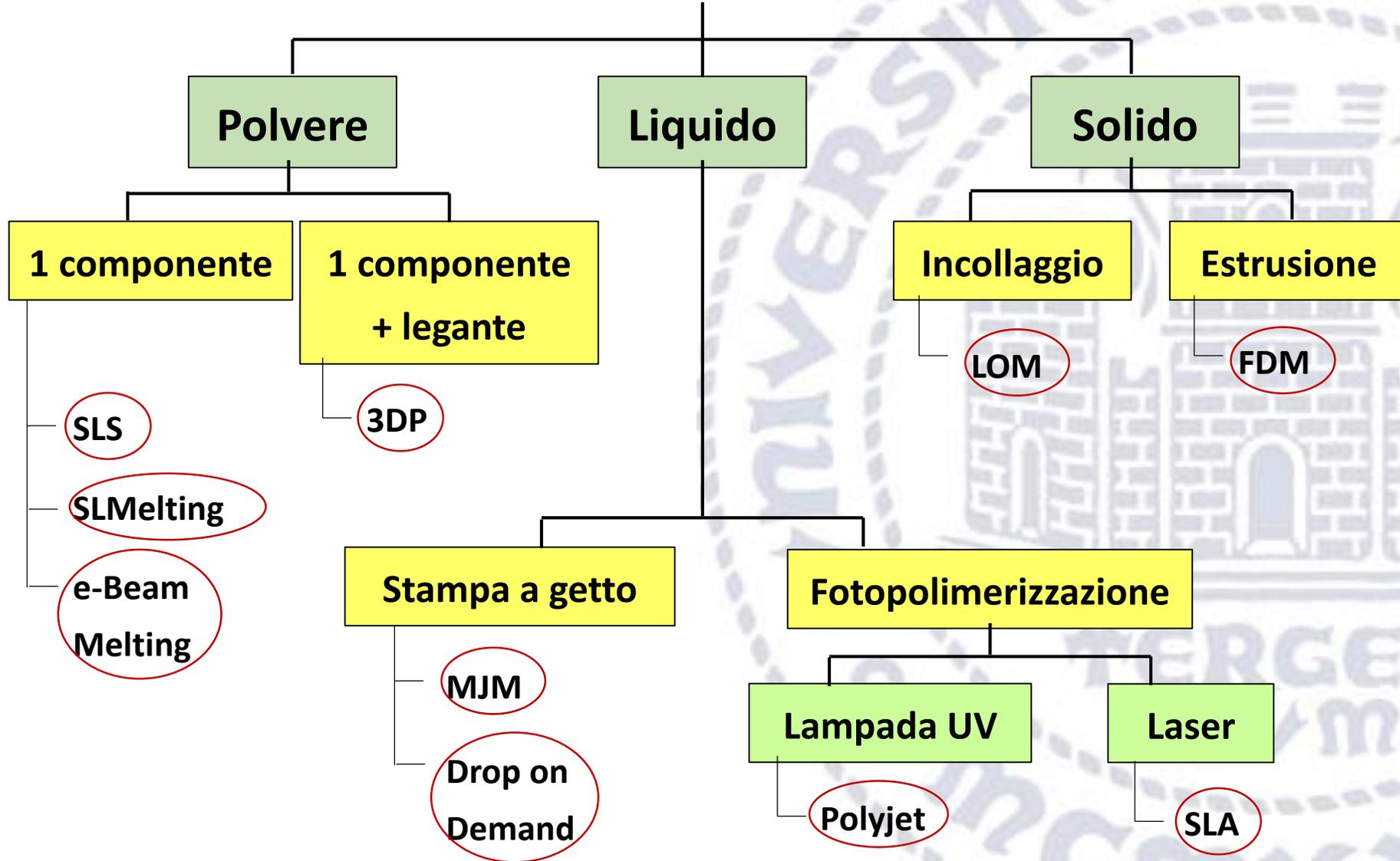
- Multi-jet modeling (MJM)

Simile a SLA e 3DP, la testa di stampa contiene 352 testine (in 200 mm).

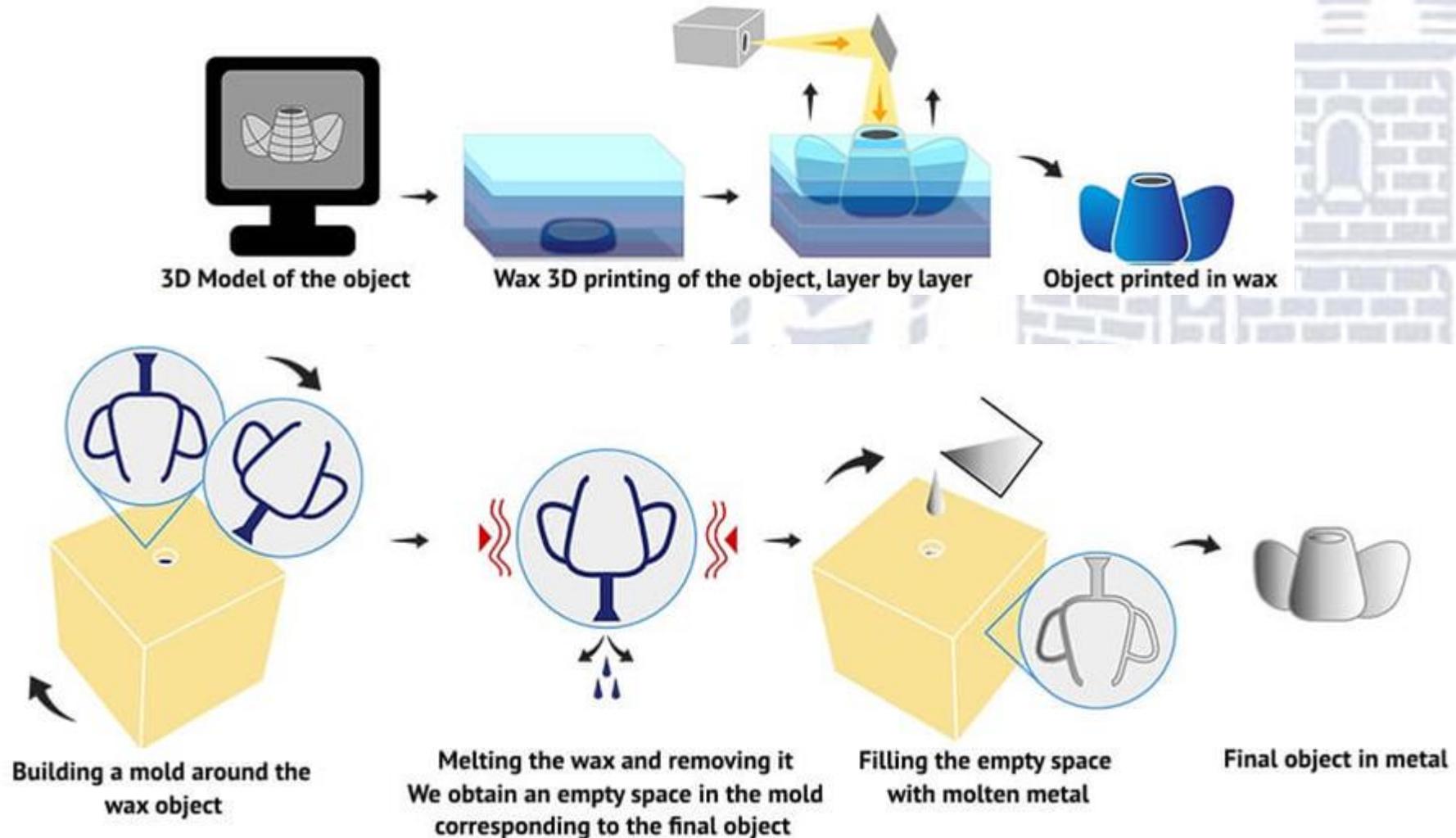
Le testine depositano un materiale termoplastico liquefatto, quando una sezione è completata la piattaforma di costruzione si abbassa e le testine riprendono la costruzione della sezione successiva fino al completamento dell'oggetto



# Tecniche RP



- fabbricazione di stampi per fusione a cera persa



Nel settore medicale: pezzi personalizzati



Placca metallica / e-beam melting



Protesi dentali in Cr-Co



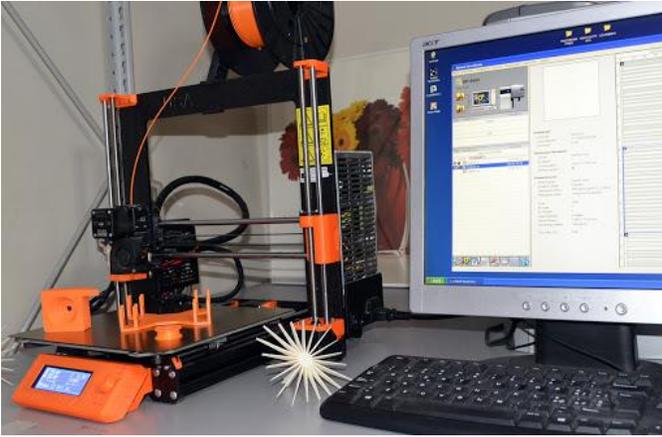
Protesi acustiche



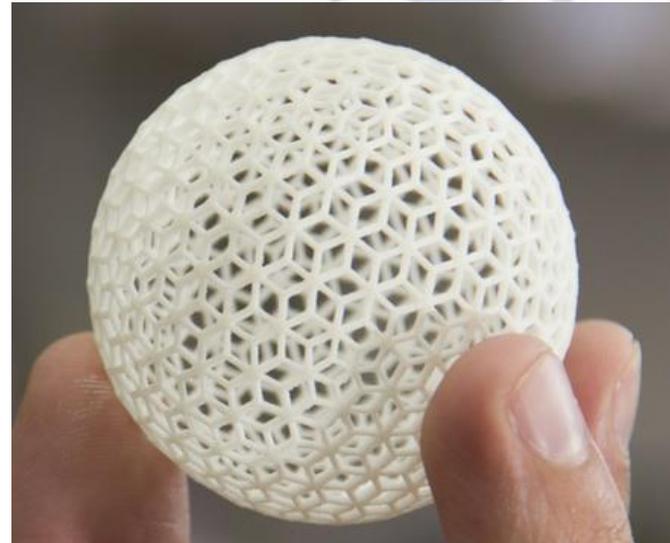
Dima guida per impianto di una  
protesi metacarpofalangea (alluce),  
durante un test reale

Dimensioni: ~ 60 x 25 x 15 mm //  
polvere Ti

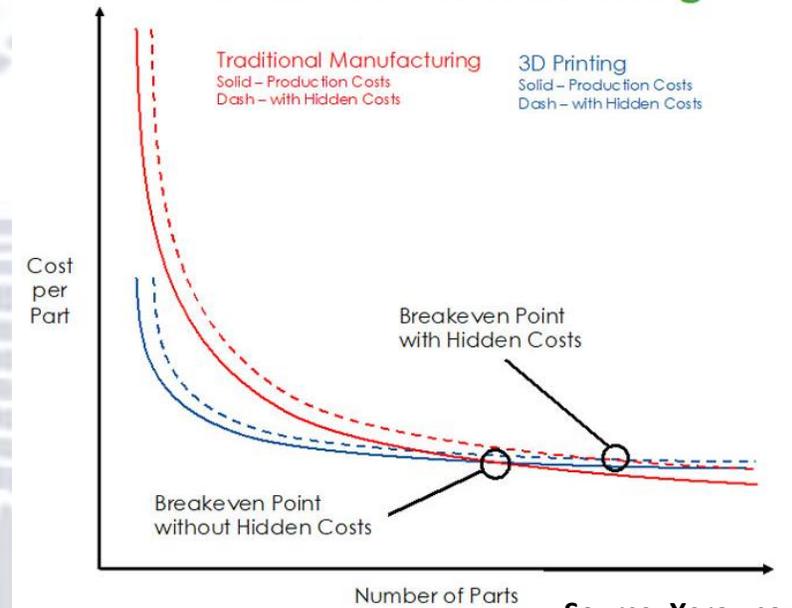
# Vantaggi Stampa 3D



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



## Cost Curves: 3D Printing versus Traditional Manufacturing



Source: Xerox.com



# DESIGN RULES FOR 3D PRINTING

## Limiti Stampa 3D

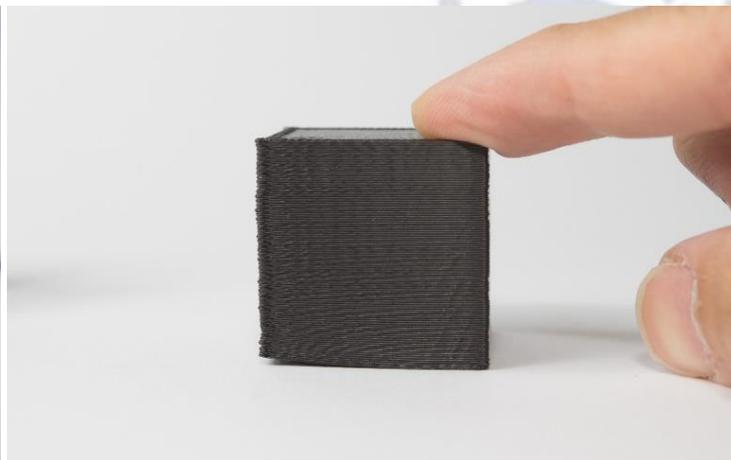
Processo:

- Sporgenze
- Spessori
- Warping
- Livello di dettaglio

Tecnologia:

- Materiali a disposizione
- Volume stampante
- Proprietà/Qualità
- Quantitativi
- Normative

	Supported Walls	Unsupported Walls	Support & Overhangs	Embossed & Engraved Details	Horizontal Bridges	Holes	Connecting /Moving Parts	Escape Holes	Minimum Features	Pin Diameter	Tolerance
	Walls that are connected to the rest of the print on at least two sides.	Unsupported walls are connected to the rest of the print on less than two sides.	The maximum angle a wall can be printed at without requiring support.	Features on the model that are raised or recessed below the model surface.	The span a technology can print without the need for support.	The minimum diameter a technology can successfully print a hole.	The recommended clearance between two moving or connecting parts.	The minimum diameter of escape holes to allow for the removal of build material.	The recommended minimum size of a feature to ensure it will not fail to print.	The minimum diameter a pin can be printed at.	The expected tolerance (dimensional accuracy) of a specific technology.
Fused Deposition Modeling	0.8 mm	0.8 mm	45°	0.6 mm wide & 2 mm high	10 mm	Ø2 mm	0.5 mm		2 mm	3 mm	±0.5% (lower limit ±0.5 mm)
Stereo-lithography	0.5 mm	1 mm	support always required	0.4 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.5 mm	4 mm	0.2 mm	0.5 mm	±0.5% (lower limit ±0.15 mm)
Selective Laser Sintering	0.7 mm			1 mm wide & high		Ø1.5 mm	0.3 mm for moving parts & 0.1 mm for connections	5 mm	0.8 mm	0.8 mm	±0.3% (lower limit ±0.3 mm)
Material Jetting	1 mm	1 mm	support always required	0.5 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.2 mm		0.5 mm	0.5 mm	±0.1 mm
Binder Jetting	2 mm	3 mm		0.5 mm wide & high		Ø1.5 mm		5 mm	2 mm	2 mm	±0.2 mm for metal & ±0.3 mm for sand
Direct Metal Laser Sintering	0.4 mm	0.5 mm	support always required	0.1 mm wide & high	2 mm	Ø1.5 mm		5 mm	0.6 mm	1 mm	±0.1 mm

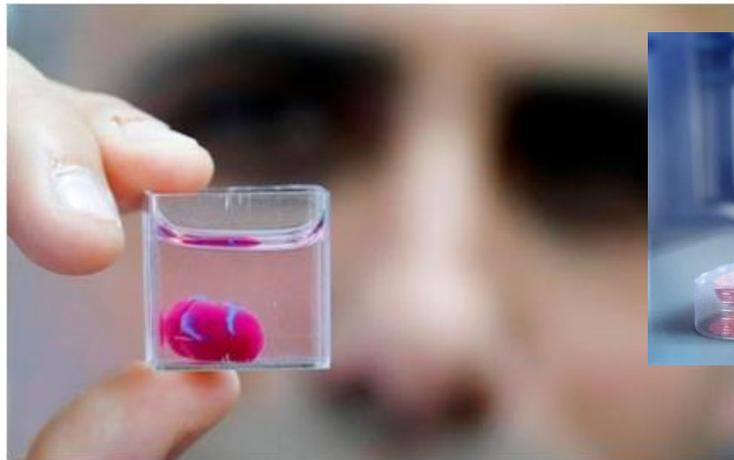


# Prospettive Future

## Tessuti Biologici Vascolarizzati

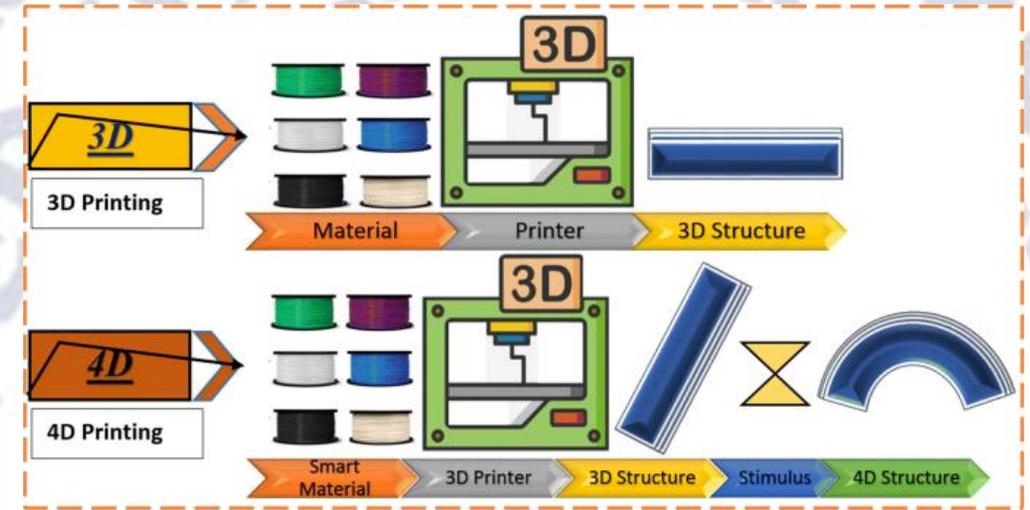
News - Science

**Tiny 3D printed human heart created by scientists in transplant breakthrough**



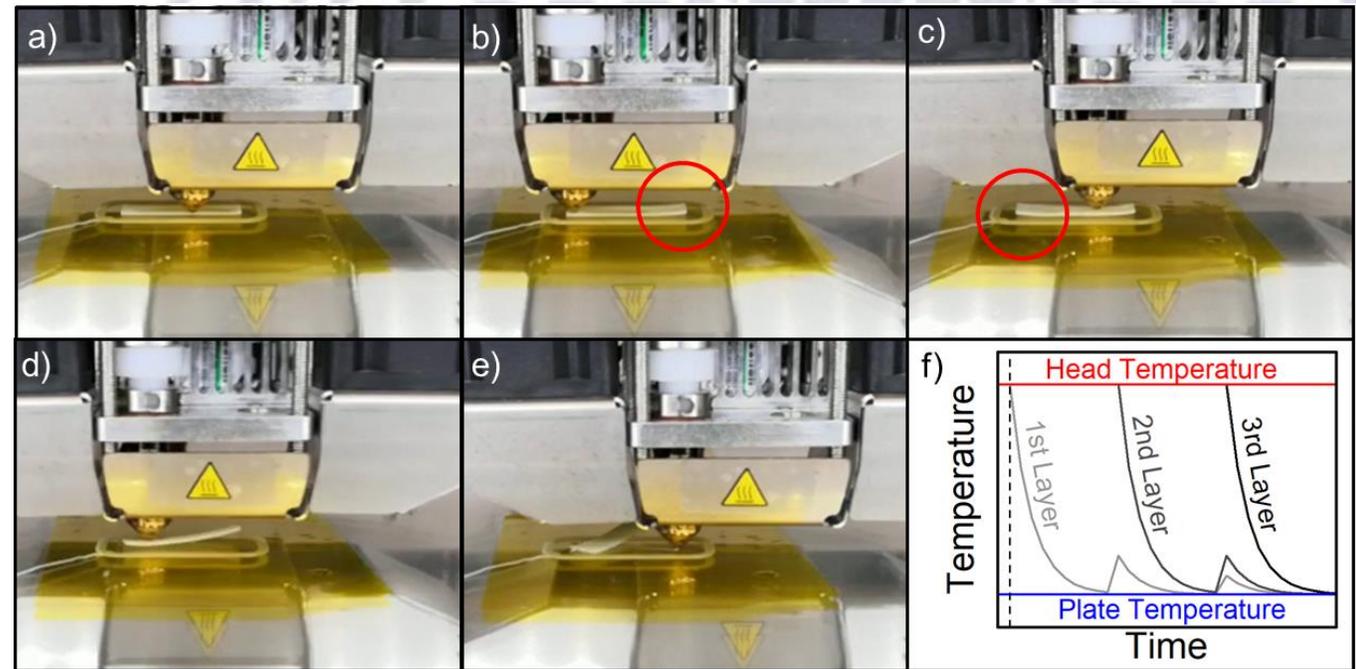
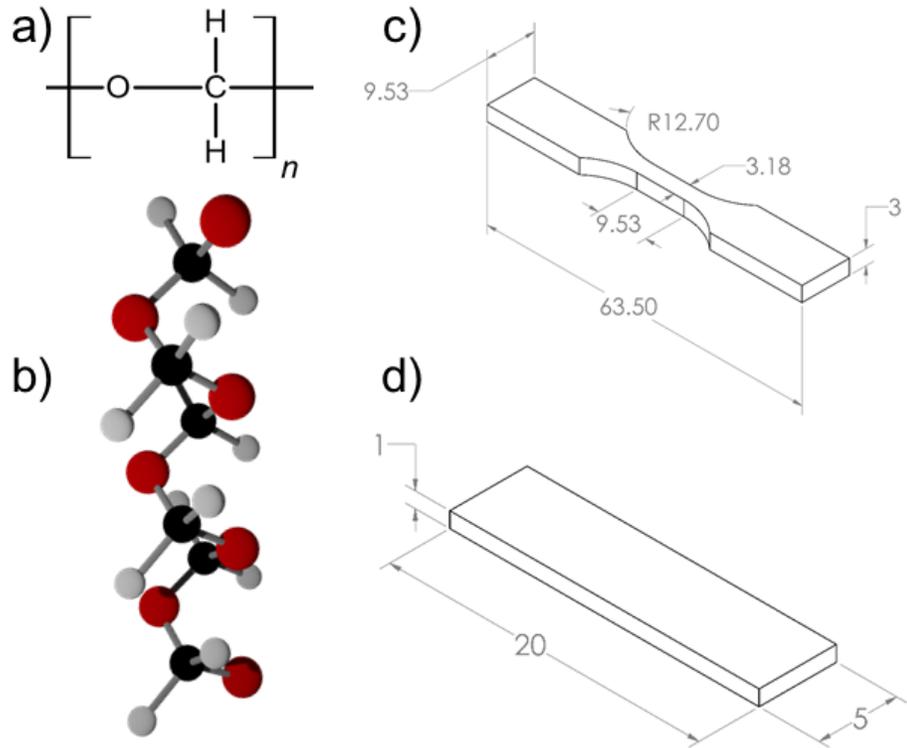
Scientists in Israel on Monday unveiled a 3D print of a heart with human tissue and vessels  
CREDIT: JACK GUEZ AFP

## 4D Printing



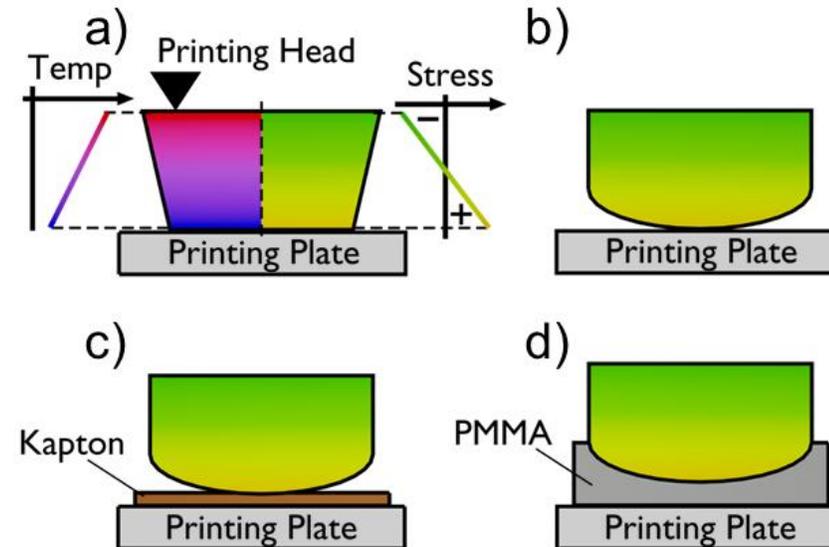
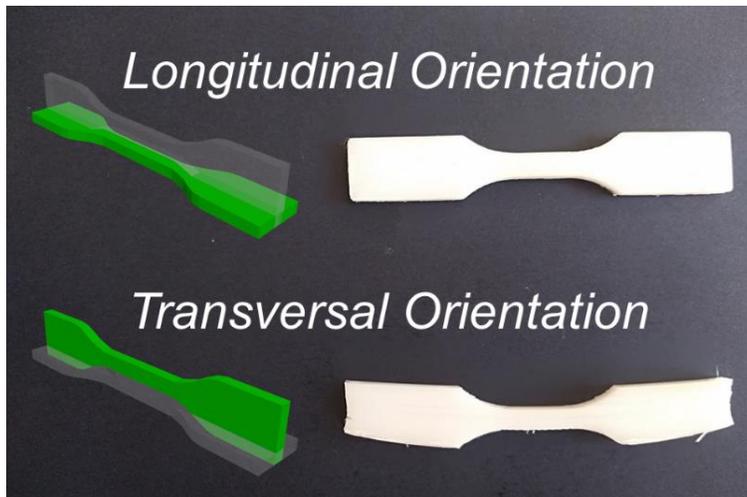
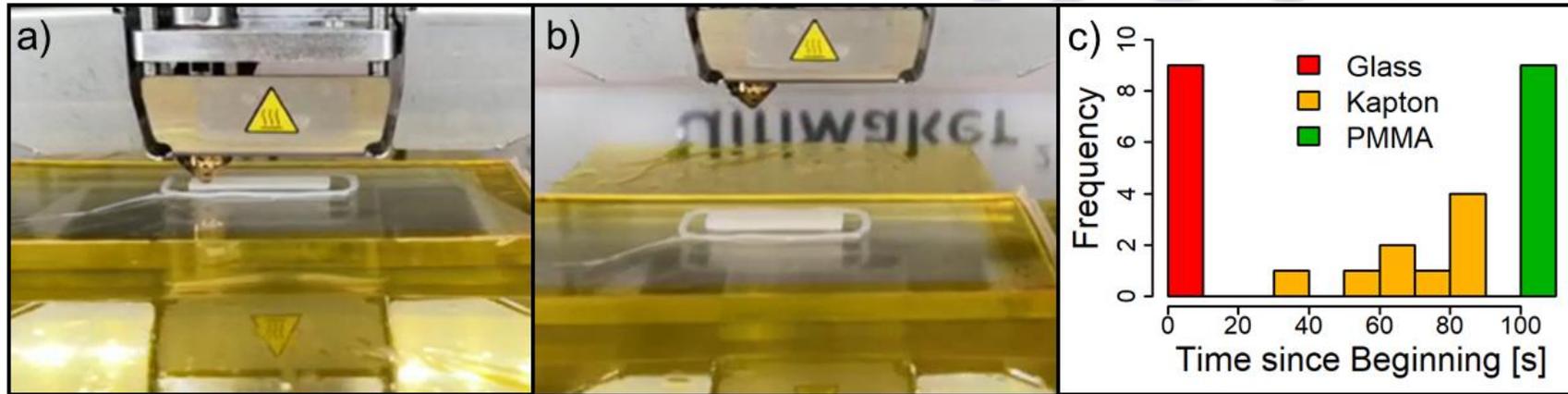
## Building

# Stampa 3D di materiali polimerici (POM)

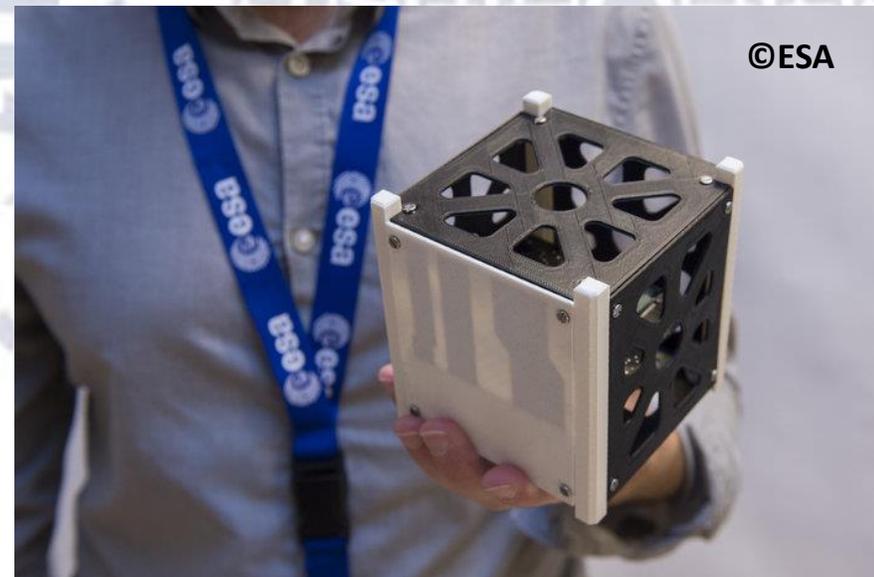
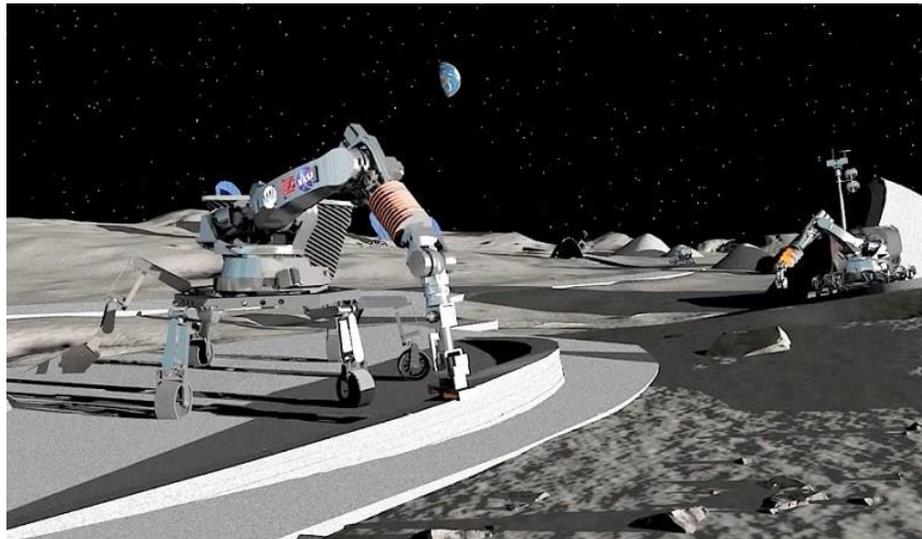
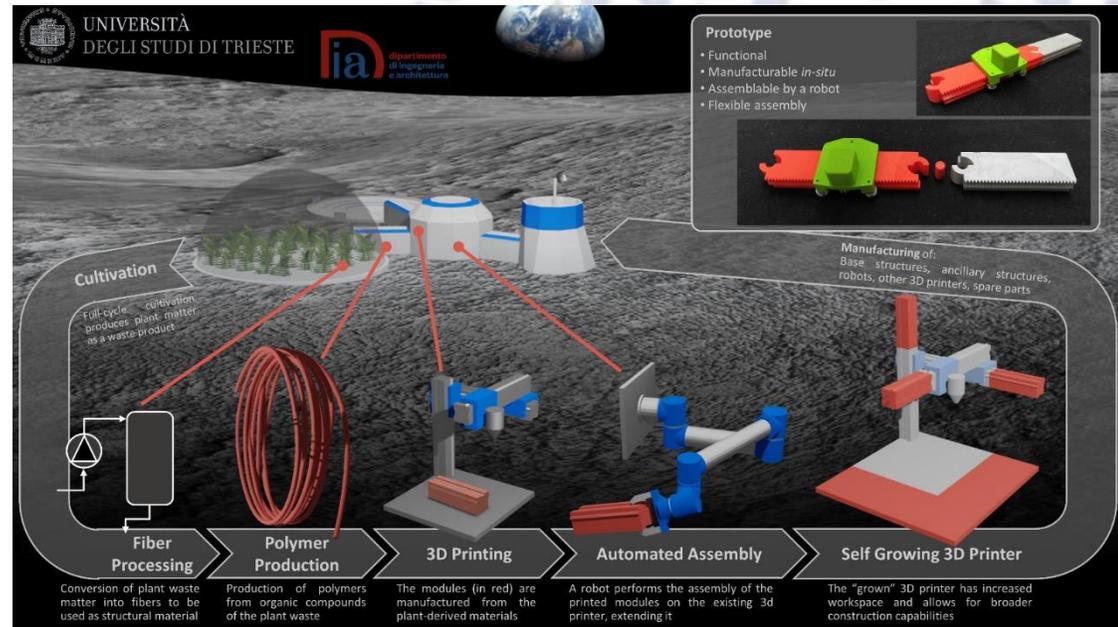
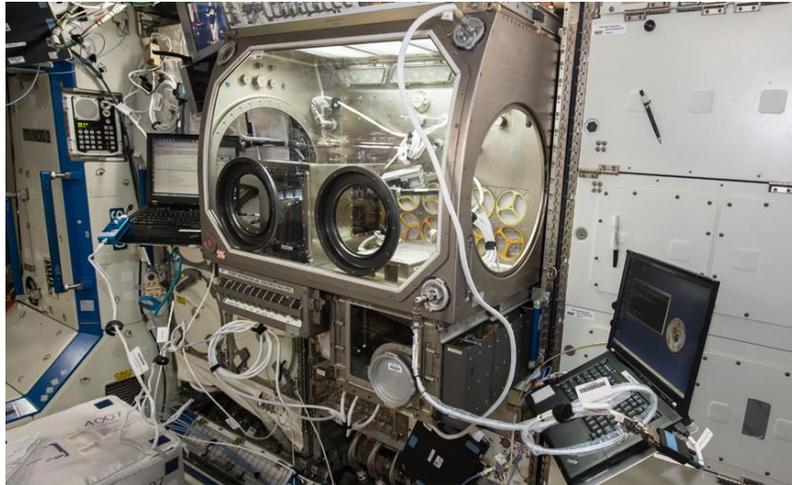


E.A. Slejko, S. Seriani, V. Lughi, J. Mater. Res. (2022)

# Stampa 3D di materiali polimerici (POM)

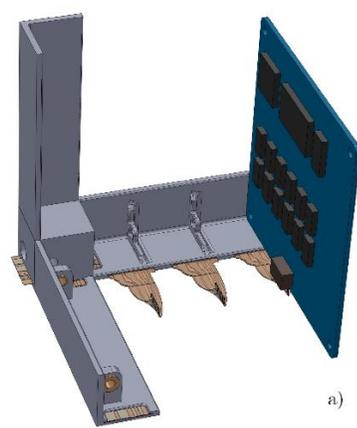
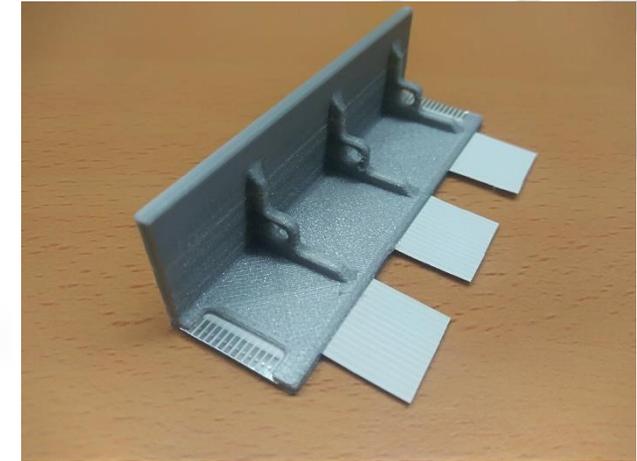
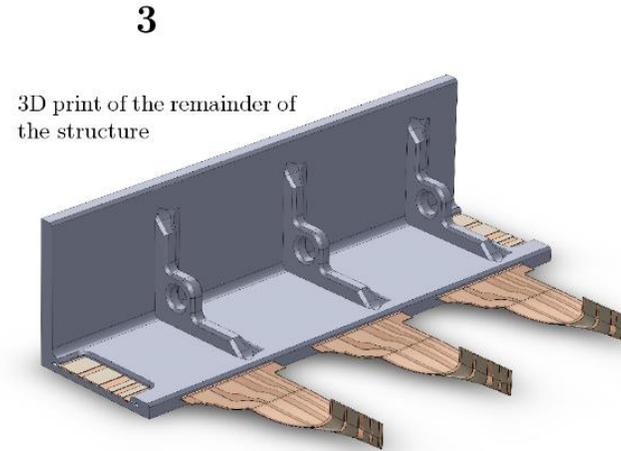
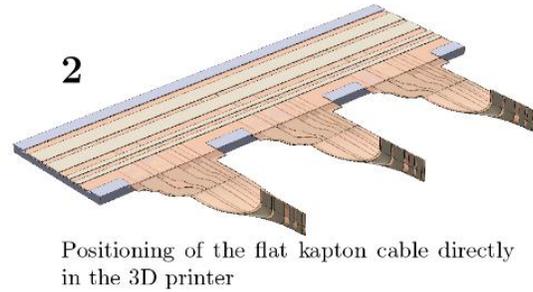
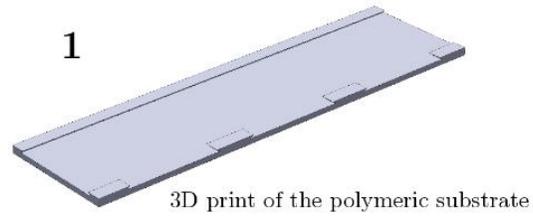


# Stampa 3D nel settore aerospaziale

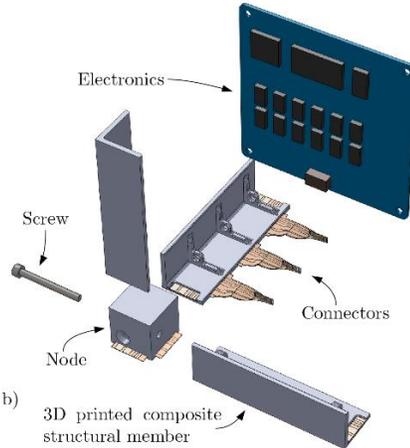


# Stampa 3D nel settore aerospaziale

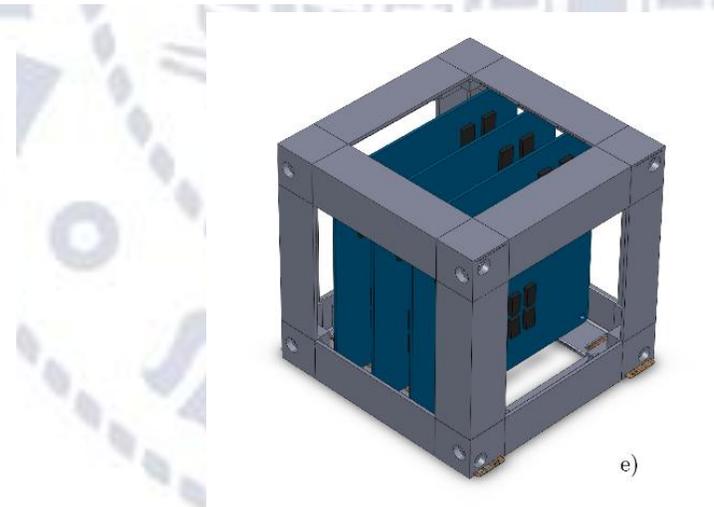
## Enabling manufacturing technology



a)



b)



e)



RESILIENT  
INTEGRATED  
STRUCTURAL  
ELEMENTS



Agenzia Spaziale Italiana



ICECUBES  
SPACE APPLICATIONS SERVICES



# Introduzione ai processi di formatura

Fenomeni connessi:

- **TRASFERIMENTO DI MASSA** (del fuso)
- **TRASFERIMENTO DI CALORE** (riscaldamento e raffreddamento)

# Fenomeni di trasporto

Caratteristiche generali dei fusi polimerici:

- ▶ riduzione di viscosità da sforzo (shear thinning)
- ▶ comportamento viscoelastico

le proprietà del flusso sono dipendenti da  $T$

# Definizioni

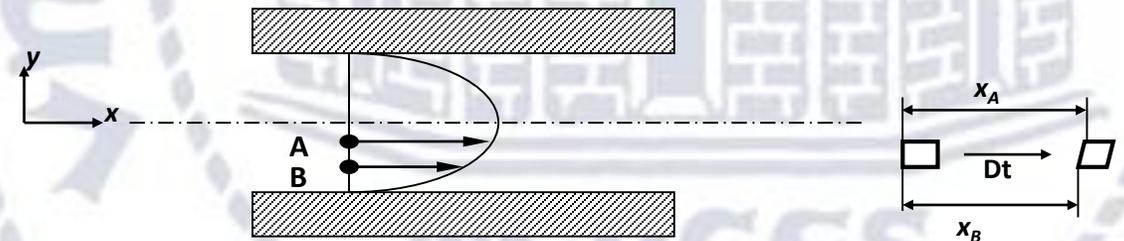
## Flusso di trascinamento (drag flow)

flusso causato dal movimento relativo di uno o più contorni del contenitore del fluido rispetto gli altri contorni (es. estrusore)

## Flusso di pressione

flusso causato dalla presenza di un gradiente di pressione nel fluido (es. ugello dell'estrusore)

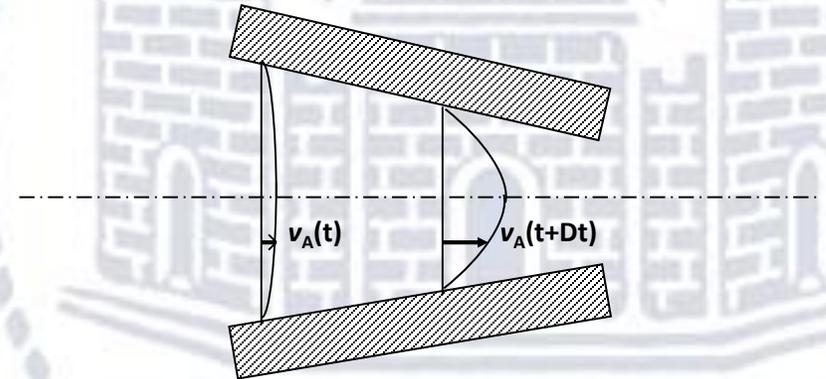
**Taglio** (shear) – deformazione/forza di taglio  
se esiste variazione di velocità nella direzione  $\perp$  al flusso



# Fenomeni di trasporto

**Elongazione** – allungamento

se esiste variazione di velocità nella direzione  $\parallel$  flusso



**Flusso a pistone** (plug flow)

tutti gli elementi di fluido si muovono alla stessa velocità.

Non esiste taglio

# Fenomeni di trasporto

**Velocità di taglio** / gradiente di velocità / velocità di deformazione (shear rate)

$\dot{\gamma}$  differenza di velocità per unità di distanza  $\perp$  alla direzione del flusso

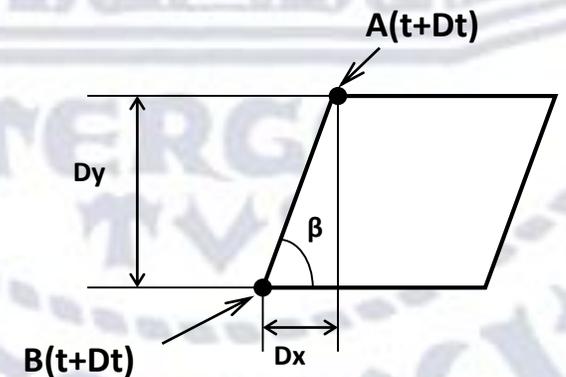
$$\dot{\gamma}_{AB} = \frac{v_A - v_B}{AB} \quad \dot{\gamma} = \lim_{AB \rightarrow 0} \frac{v_A - v_B}{AB} = \frac{dv(x)}{dy} \quad \dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

x: direzione flusso  
y: direzione  $\perp$  a flusso

**Deformazione di taglio** (shear strain) [adimensionale]

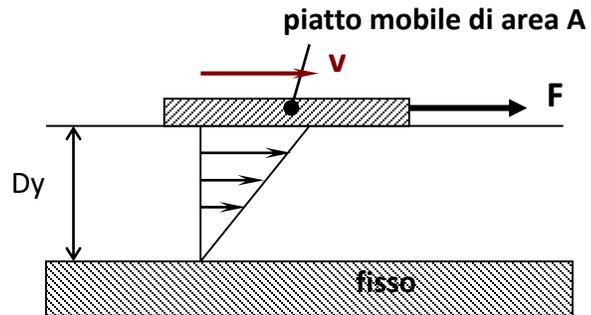
$\gamma$  spostamento nella direzione del flusso per unità di distanza  $\perp$   
in un certo periodo di tempo t

$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt \quad \gamma_{AB} = \frac{x_A - x_B}{AB} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{1}{\text{tg } \beta}$$



## Sforzo di taglio (shear stress) $\tau$

sforzo necessario per raggiungere una deformazione di taglio (scorrimento)



$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{\Delta y}$$

## Viscosità di taglio (shear viscosity) $\eta$

resistenza al flusso di taglio

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

[Poise =  $\text{dine} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ ]

[Pa·s = 10 poise]

## Fluido Newtoniano:

La viscosità è INDIPENDENTE da

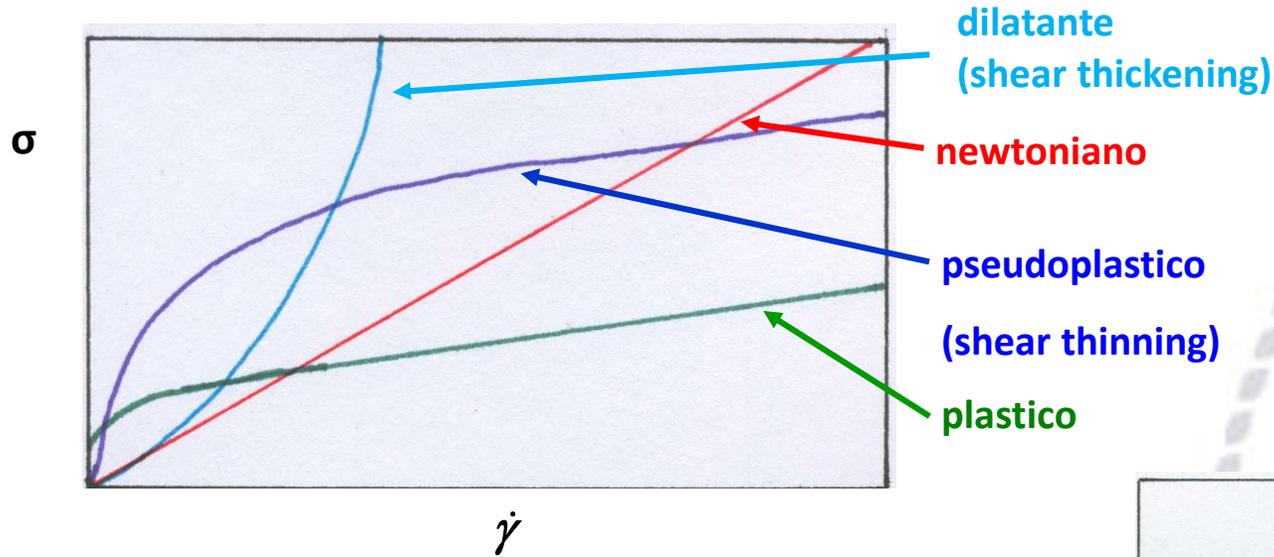
$\dot{\gamma}$

## Fluido NON Newtoniano (dilatante – pseudoplastico):

La viscosità E' DIPENDENTE da

$\dot{\gamma}$

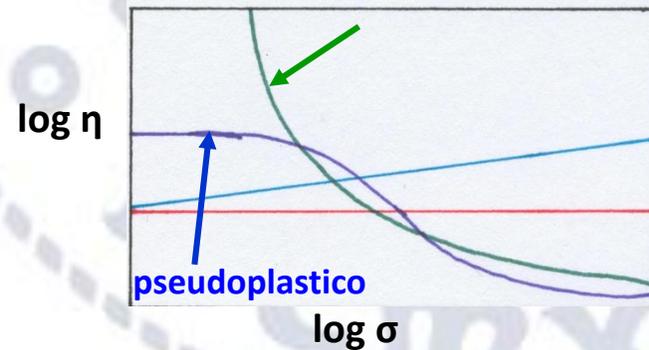
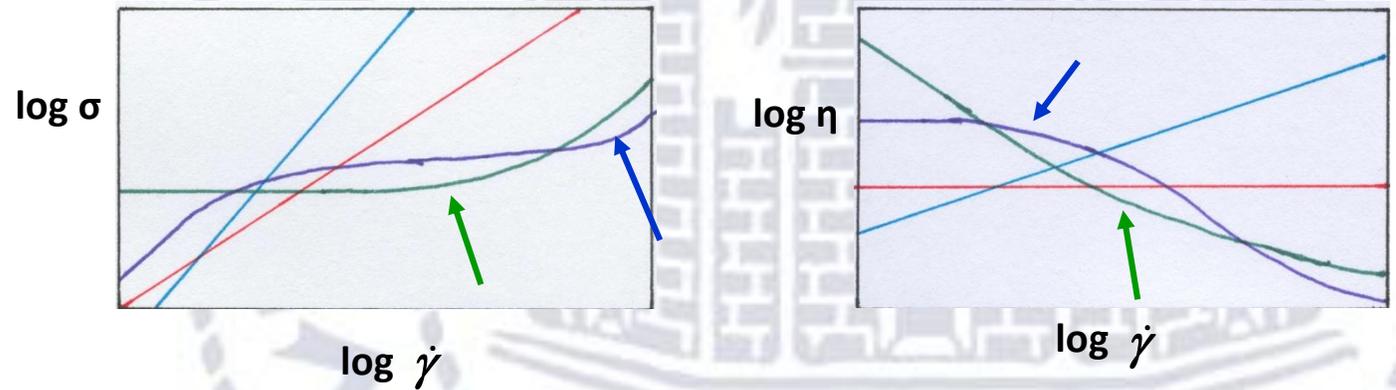
*La Reologia è la scienza che studia il comportamento di un fluido durante la deformazione indotta dal flusso*



**Dilatanti:** sospensioni di particelle stabilizzate - deformazioni ( $\gamma$ ) elevate

**Pseudoplastici:** soluzioni polimeriche, fusi polimerici

**Plastici:** sospensioni di particelle aggregate, gel deboli, soluzioni polimeriche e fusi polimerici con cariche solide (F solido elevata)



# Fenomeni di trasporto

- ▶ La maggior parte dei processi è dominata dalla presenza di *gradienti di velocità* (shear rate)  $\Rightarrow \eta$  è misurata utilizzando strumenti che misurano le deformazioni a taglio (deformazioni di scorrimento)
- ▶ Processi quali *blow moulding / termoformatura / filatura* sono dominati sia da *deformazioni di allungamento* che da una combinazione di *deformazione di scorrimento* (taglio) e *di allungamento*
- ▶ Alcuni fusi polimerici presentano un significativo *effetto elastico* durante la deformazione

Viscosità: parametro più usato per determinare il comportamento dei polimeri durante i processi di formatura

# Fluido newtoniano generalizzato

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T) \quad \bar{\tau} = \eta(\dot{\gamma}, T) \bar{\dot{\gamma}} \quad \bar{\dot{\gamma}} = \nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^t$$

$\bar{x}$  : vettore  
 $\underline{\underline{x}}$  : tensore

$\nabla$  Divergenza

Il modulo del tensore della velocità di deformazione è:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ji}} \quad \text{con} \quad \dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$$

Solitamente per la viscosità si può separare la dipendenza con T:

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T) = f(T) \cdot \eta(\dot{\gamma}) \quad \text{con} \quad f(T) = e^{-a(T-T_0)} \quad \text{per piccole variazioni di T}$$

Una variazione di T corrisponde ad uno slittamento nella scala dei tempi:

$$a_T(T) = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} = e^{\frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$E_0$ : energia di attivazione a  $T_0$

Fattore di spostamento

# Modello di fluido viscoso

**Legge di potenza**  $\eta = m(T) \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)}$  con:  $m$ , indice di consistenza  
 $n$ , indice della legge di potenza

$n=1 \rightarrow$  newtoniano //  $n>1 \rightarrow$  dilatante //  $n<1 \rightarrow$  pseudoplastico

Limiti del modello

per  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$   $\eta \rightarrow 0$  reale  $\eta \rightarrow \eta_{\infty} \neq 0$

per  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$   $\eta \rightarrow \infty$   $\eta \rightarrow \eta_0 \neq \infty$

**Fluido di Bingham** Modello empirico che rappresenta il comportamento reologico di un materiale che presenta una regione di *non flusso* al di sotto di un certo  $\tau$  [es: emulsioni e sospensioni polimeriche // dentifricio, lava, fluidi di carotaggio, pitture, ...]

$$\eta = \infty \quad \text{per} \quad \dot{\gamma} = 0 \quad \text{per} \quad \tau \leq \tau_y$$

$$\eta = \mu_0 + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \quad \text{per} \quad \tau \geq \tau_y$$

## Viscosità di allungamento

$$\dot{\gamma}_{11} = -\dot{\varepsilon} \quad \dot{\gamma}_{22} = -\dot{\varepsilon} \quad \dot{\gamma}_{33} = -2\dot{\varepsilon} \quad \dot{\varepsilon} = \text{velocità di allungamento}$$

$$\sigma_{11} = -P - \eta \cdot \dot{\varepsilon} = \sigma_{22} \quad \text{e} \quad \sigma_{33} = -P + 2 \cdot \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad \text{Se } \sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$$

$$P = -\eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad \text{e} \quad \sigma_{33} = 3 \cdot \eta \cdot \dot{\varepsilon} = \bar{\eta} \cdot \dot{\varepsilon}$$

con  $\bar{\eta}$  (o  $\lambda$ ), viscosità di allungamento o viscosità di Trouton

$$\lambda \approx 3\eta$$

Per deformazioni *perfettamente* elastiche:

$$\sigma = E \varepsilon \quad \text{con} \quad E: \text{ modulo di elasticità}$$

Analogamente si definisce

$$\tau = G \gamma \quad \text{con} \quad G: \text{ modulo di taglio}$$

$$\frac{E}{G} = \frac{\sigma \cdot \gamma}{\varepsilon \cdot \tau} = 2 \cdot (1 + \nu)$$

per corpi *incomprimibili* è  $\nu = 0,5$

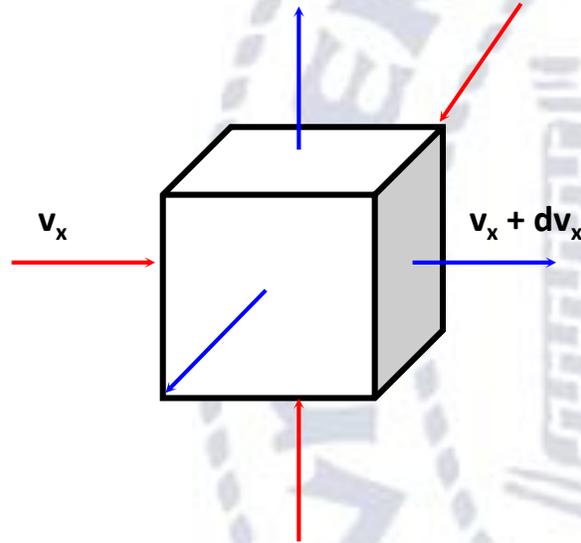
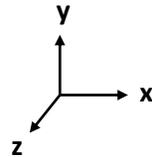
con  $\nu$ : modulo di Poisson

$$\Rightarrow \frac{E}{G} = 3$$

## Liquidi incompressibili – equazione di moto

Da bilancio di massa sull'elemento di volume  $dV$

*sezione rettangolare:*



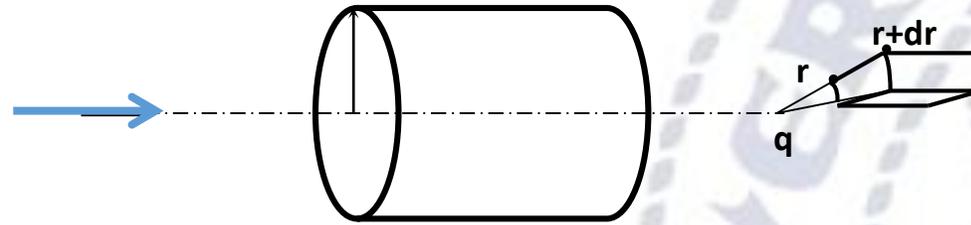
$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$\nabla \bar{v} = 0$$

*Divergenza  $d\bar{v}$*

equazione di continuità per materiale incompressibile

sezione circolare:



$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

In presenza di campo gravitazionale [g], l'equazione di moto diventa (eq. Navier-Stokes):

$$\rho \cdot \frac{D\bar{v}}{Dt} = \nabla \bar{\sigma} + \rho \cdot \bar{g}$$

inerzia del fuso polimerico

forze elastiche e viscosi

effetto gravitazionale

$$\rho \cdot \frac{D\bar{v}}{Dt} = \nabla \bar{\sigma} + \rho \cdot \bar{g}$$

con  $\bar{\sigma}_{totale} = \bar{\tau}_{deviatorica} + \bar{\sigma}_{idrostatica} = \bar{\tau}_{deviatorica} - P \cdot \bar{\delta}$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \nabla \bar{v}$$

$$\Rightarrow \rho \cdot \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\nabla P + [\nabla \cdot \bar{\tau}] + \rho \cdot \bar{g}$$

sezione rettangolare

x:

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho \cdot g_x$$

idem per y e z

tensore unitario

# Trasferimento di massa

Flusso di fluido in un canale

*componenti viscosi*

sez. cost.:  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$

$\eta$ : viscosità di taglio

sez. variabile:  $\sigma = \lambda \cdot \dot{\epsilon}$

$\lambda$ : viscosità di trazione

se  $\sigma$  basso:  $\lambda \approx \text{cost} \approx 3\eta$

*componenti elastiche*

sez. cost.:  $G = \frac{\tau}{\gamma_R}$

$G$ : modulo di taglio

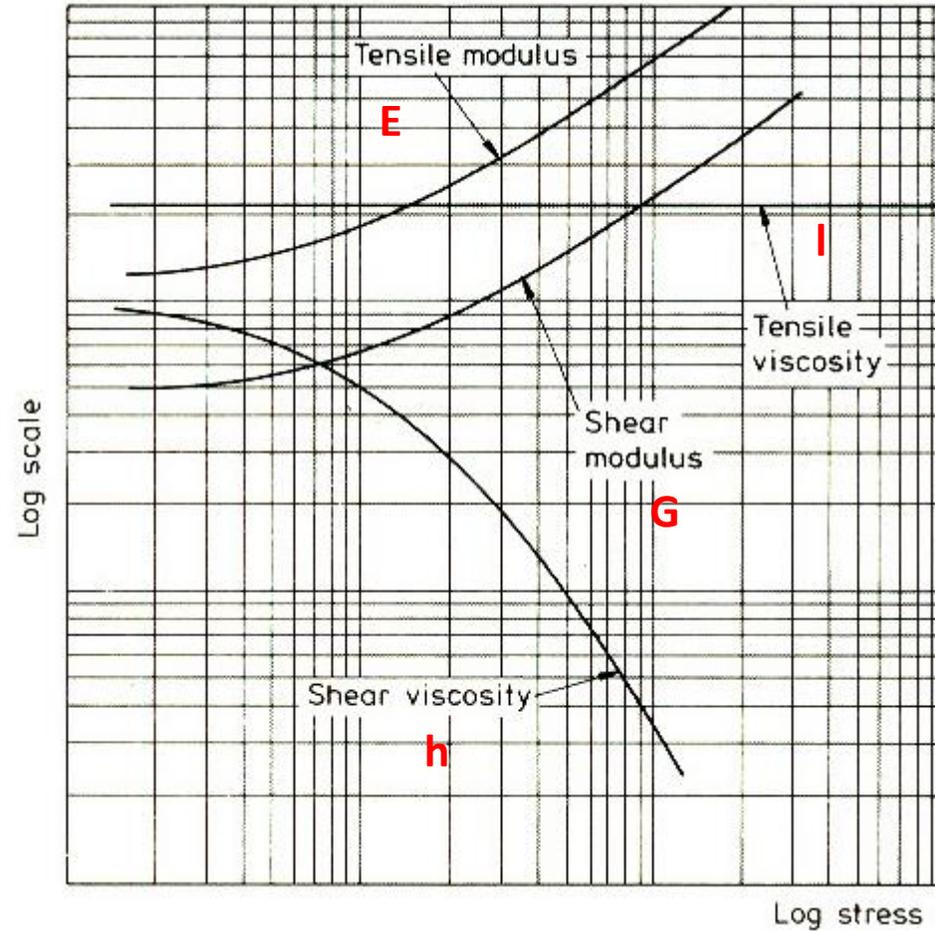
$\gamma_R$ : deform. recuperabile

sez. variabile:  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_R}$

$E$ : modulo di trazione

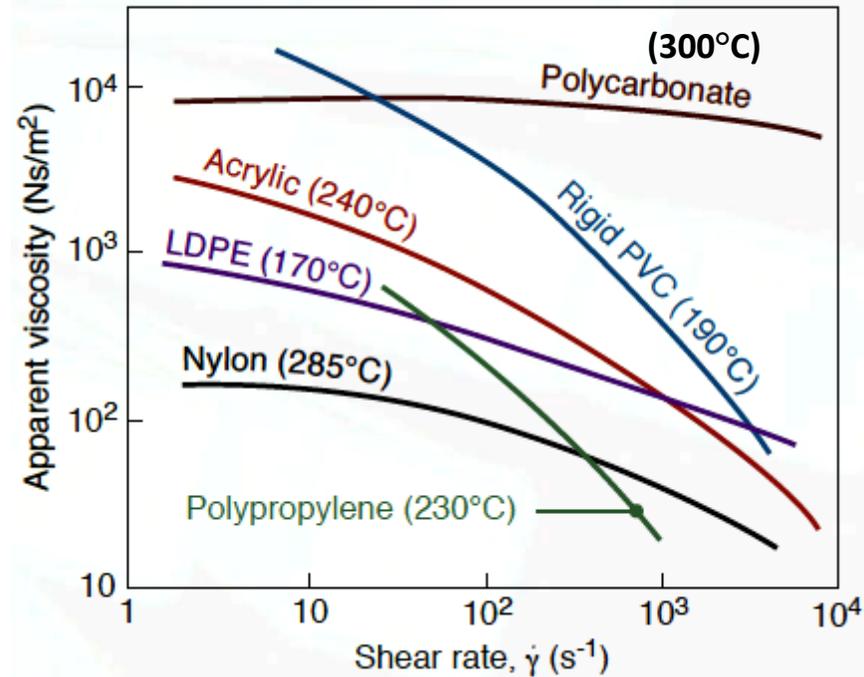
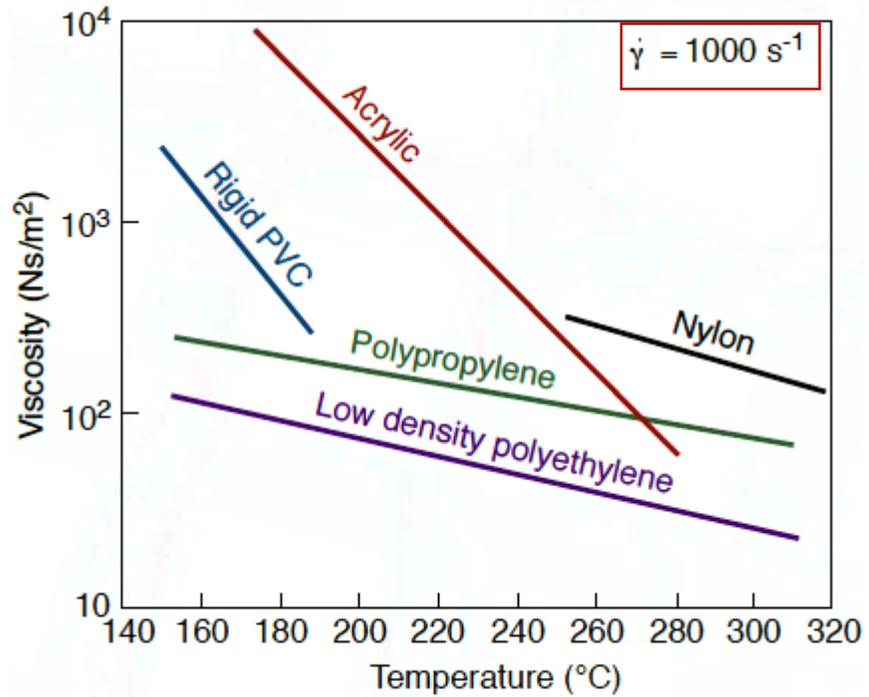
$\epsilon_R$ : deform. recuperabile

E e G **non** sono costanti del materiale



Andamento tipico delle proprietà di un fuso polimerico

La viscosità varia con T e con la velocità di taglio



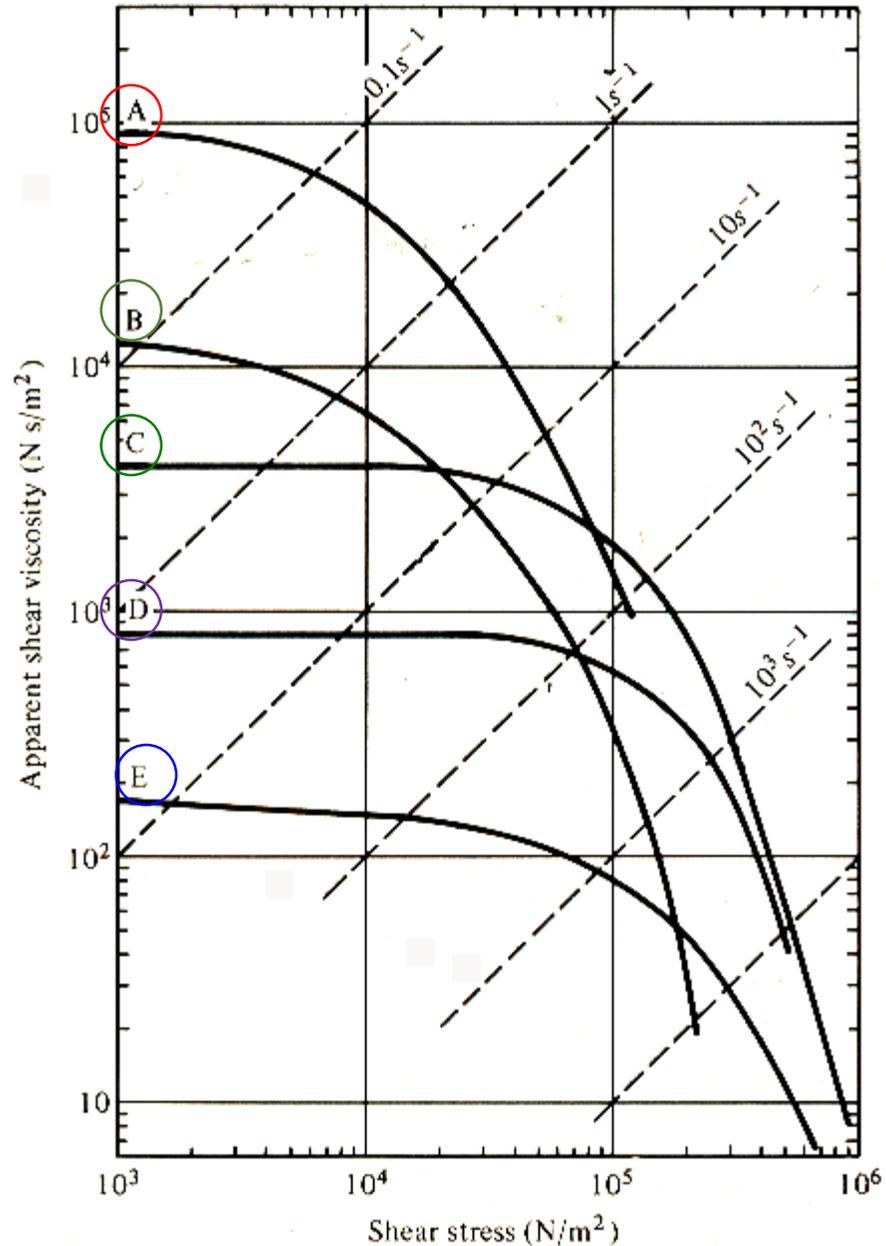
A: LDPE 170°C

B: PP-PE 230°C

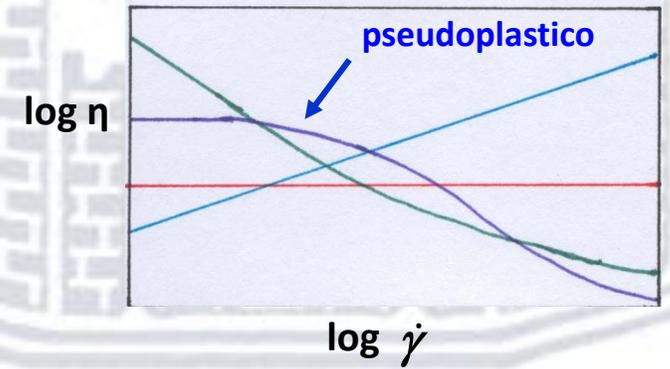
C: poliacrilato 230°C

D: copolimero acetico 200°C

E: PA6,6 285°C



A-B: polimeri simili,  $\neq T$ :  $T \uparrow \eta \downarrow$



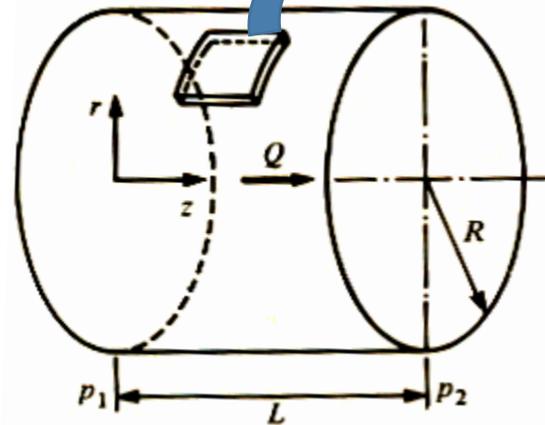
# Cenni di reologia del fuso

## Fluido newtoniano

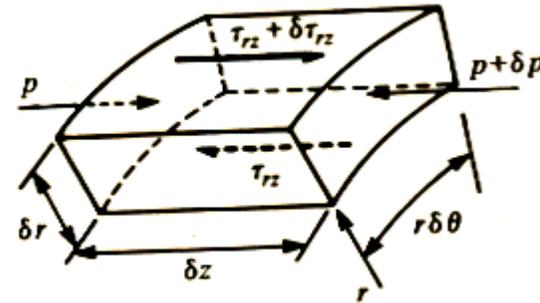
ipotesi:

- flusso isoterma, stazionario, laminare, indipendente da  $t$
  - fluido incompressibile
  - velocità a parete nulla
  - effetti di bordo trascurabili (scarico)
- 
- **flusso dovuto a  $\delta P$** 
    - sez. cost. circolare
    - sez. cost. rettangolare
  - **flusso dovuto a trascinamento**

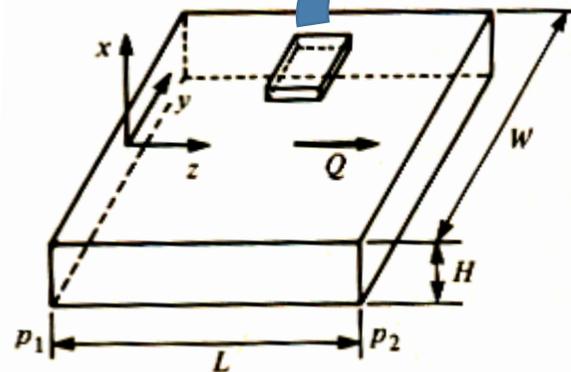
Sezione circolare



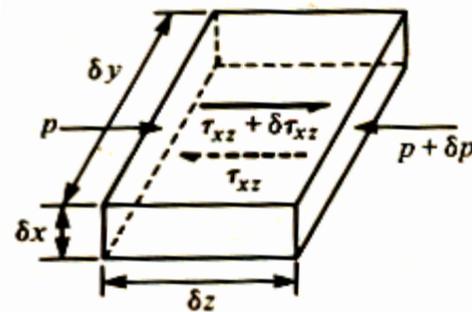
elemento di flusso



Sezione rettangolare



elemento di flusso



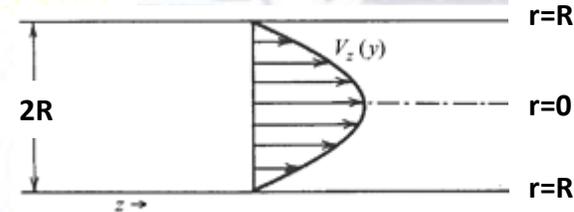
Flusso di pressione in sezione circolare di raggio R e  $L \gg R$



Condizioni al contorno  $v_z = 0$  at  $r = R$   $\partial v_z / \partial r = 0$  at  $r = 0$

Distribuzione della velocità  $v_z = \frac{1}{4\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right) (R^2 - r^2)$

Portata volumetrica  $Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right)$

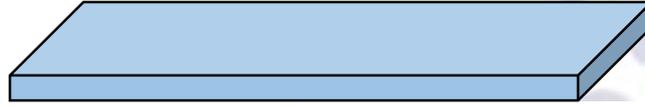


Caduta di pressione  $\Delta P = (p_2 - p_1) = -8\eta QL / \pi R^4$

Velocità di deformazione a parete  $(\dot{\gamma}_{rz})_R = \partial v_z / \partial r = -4Q / \pi R^3$

Taglio a parete  $(\tau_{rz})_R = \eta(\dot{\gamma}_{rz})_R = R\Delta P / 2L$

**Flusso di pressione** in sezione rettangolare di altezza  $H$ , profondità  $W \gg H$  e lunghezza  $L \gg H$



Condizioni al contorno

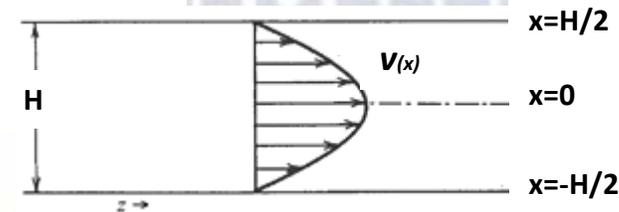
$$v_z = 0 \quad \text{at} \quad x = \pm H/2 \quad \text{pareti}$$

Distribuzione della velocità

$$v_z = \frac{1}{2\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right) \left( \frac{H^2}{4} - x^2 \right)$$

Portata volumetrica

$$Q = \frac{WH^3}{12\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$



Caduta di pressione

$$\Delta P = (p_2 - p_1) = -12\eta QL / WH^3$$

Velocità di deformazione a parete

$$(\dot{\gamma}_{xz})_{H/2} = -6Q / WH^2$$

Taglio a parete

$$(\tau_{xz})_{H/2} = H\Delta P / 2L$$

**Flusso di trascinamento** in sezione rettangolare di altezza  $H$ , profondità  $W \gg H$  e lunghezza  $L \gg H$



*Condizioni al contorno*

$$v_z = 0 \quad \text{at} \quad x = -H/2$$

*parete fissa*

$$v_z = v_1 \quad \text{at} \quad x = +H/2$$

*parete mobile*

*Distribuzione della velocità*

$$v_z = v_1 \left( \frac{x}{H} + \frac{1}{2} \right)$$

*Portata volumetrica*

$$Q = \frac{W}{2} v_1 H$$

Un fuso polimerico si comporta da fluido newtoniano se

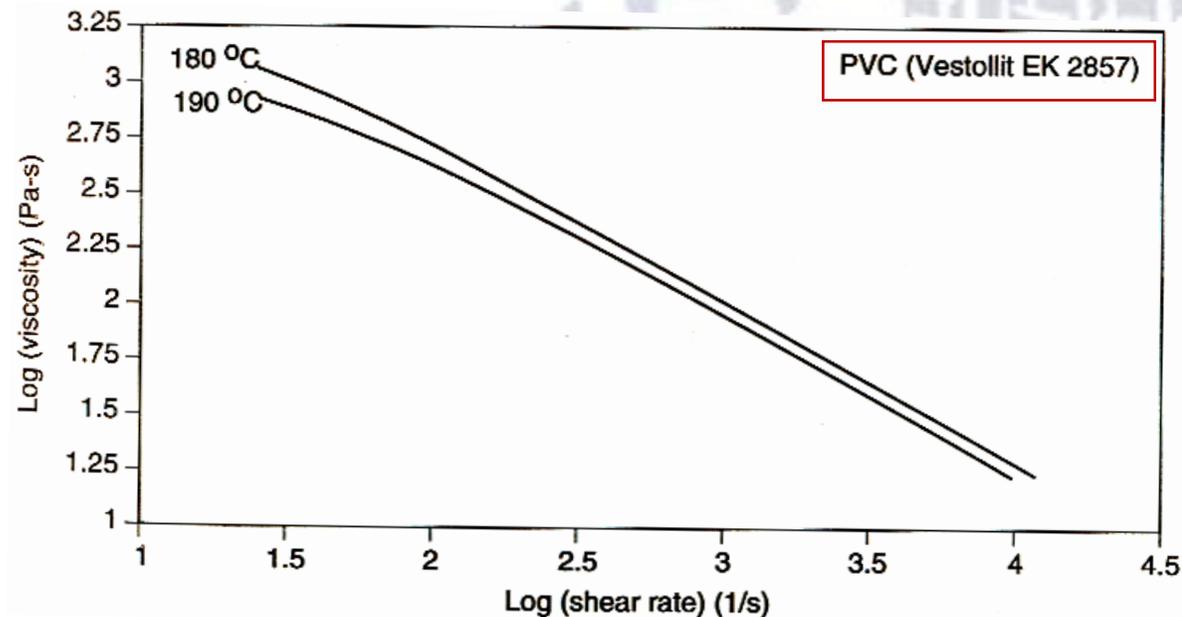
$$\dot{\gamma} \text{ bassi} \Rightarrow \eta \approx \text{cost}$$

a  $\dot{\gamma}$  alti  $\Rightarrow$  *riduzione della viscosità da sforzo* (shear thinning)

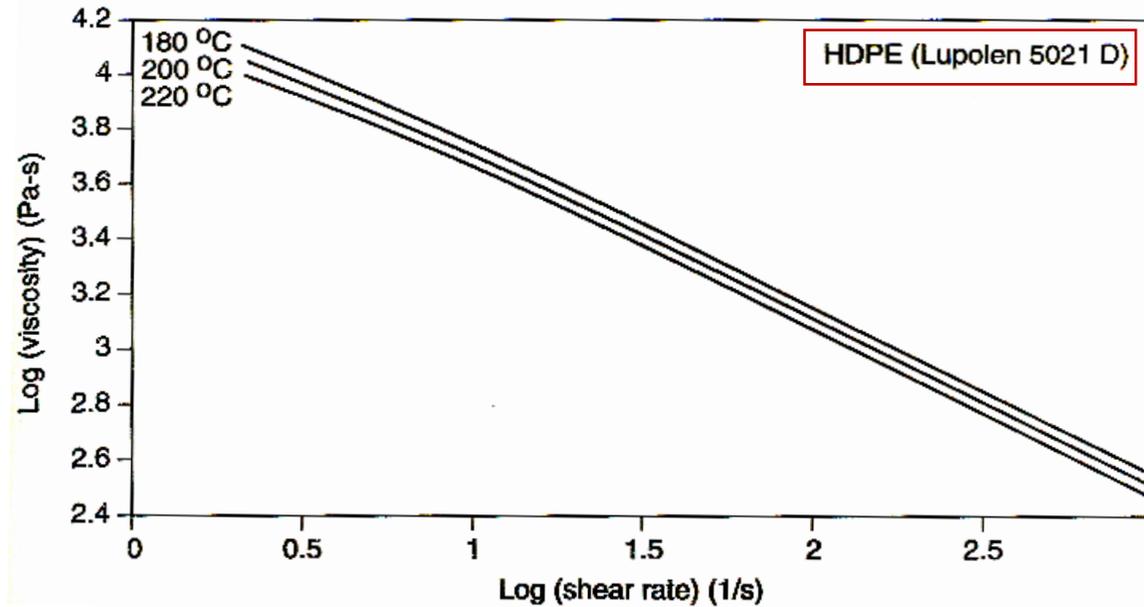
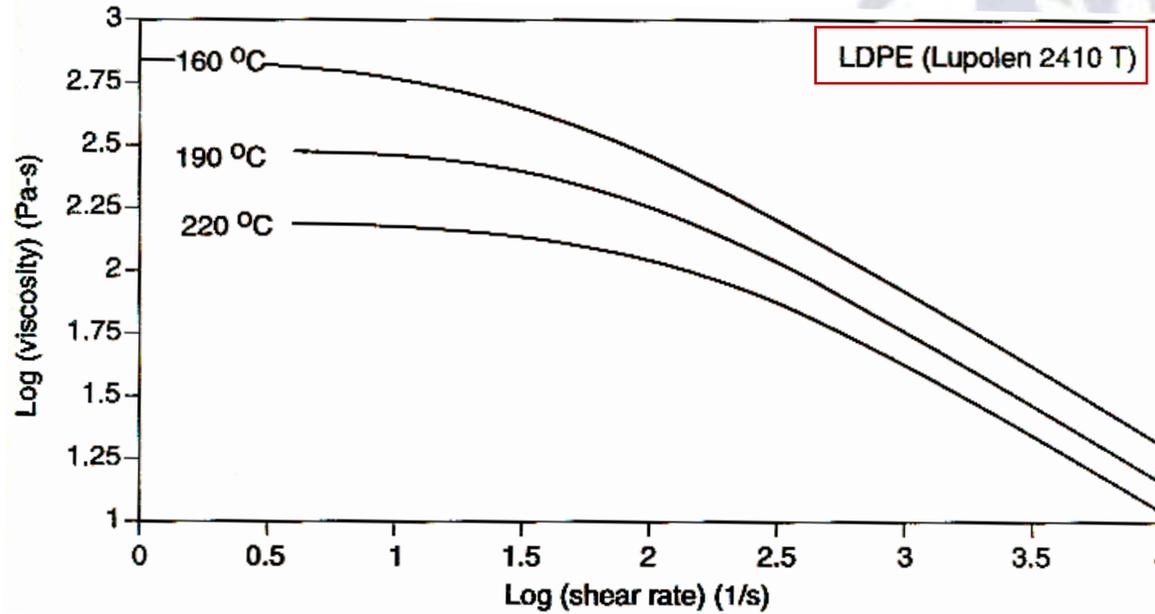
La  $\dot{\gamma}$  cui il fenomeno di caduta di  $\eta$  si verifica e la sua entità dipendono da

- Tipo di polimero
- M e sua distribuzione
- Presenza di additivi (lubrificanti o plasticizzanti)

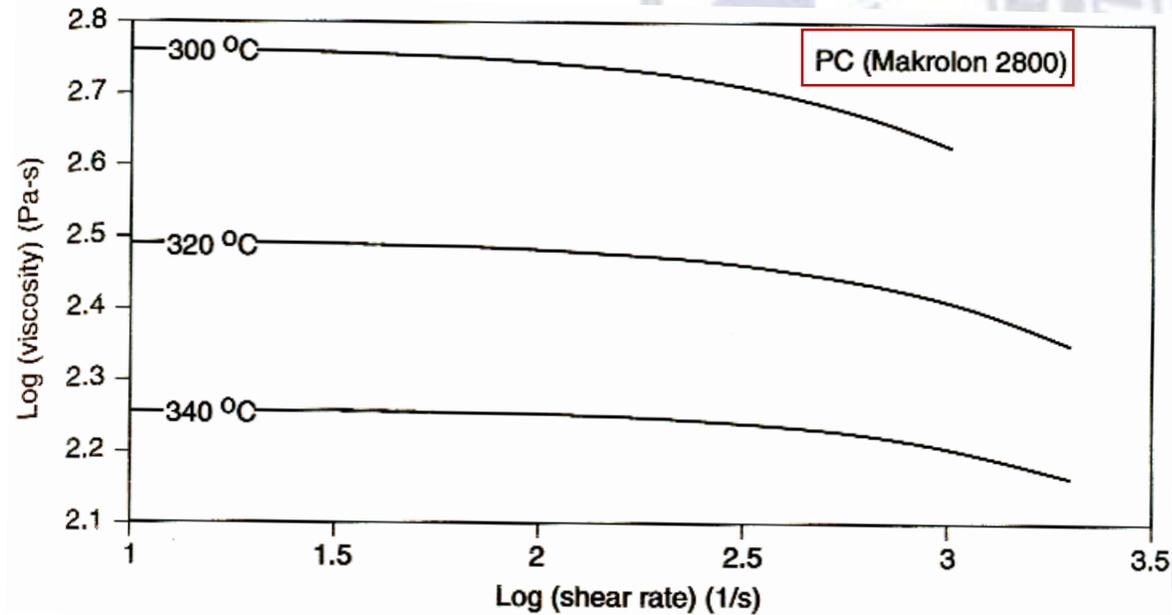
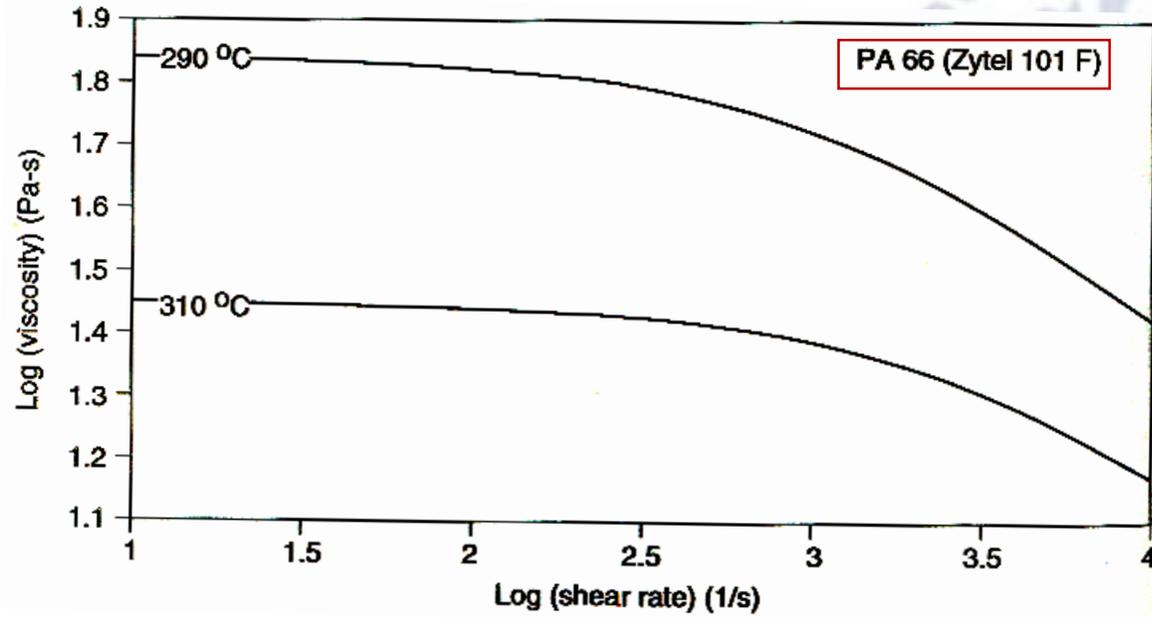
$\eta$  è  $f(T)$



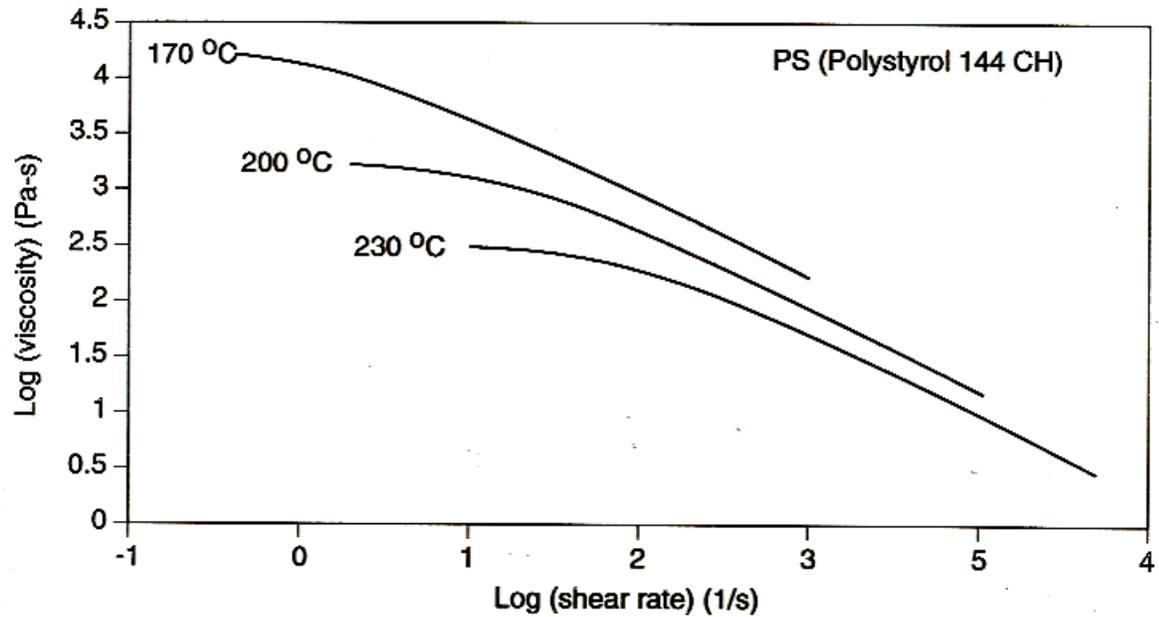
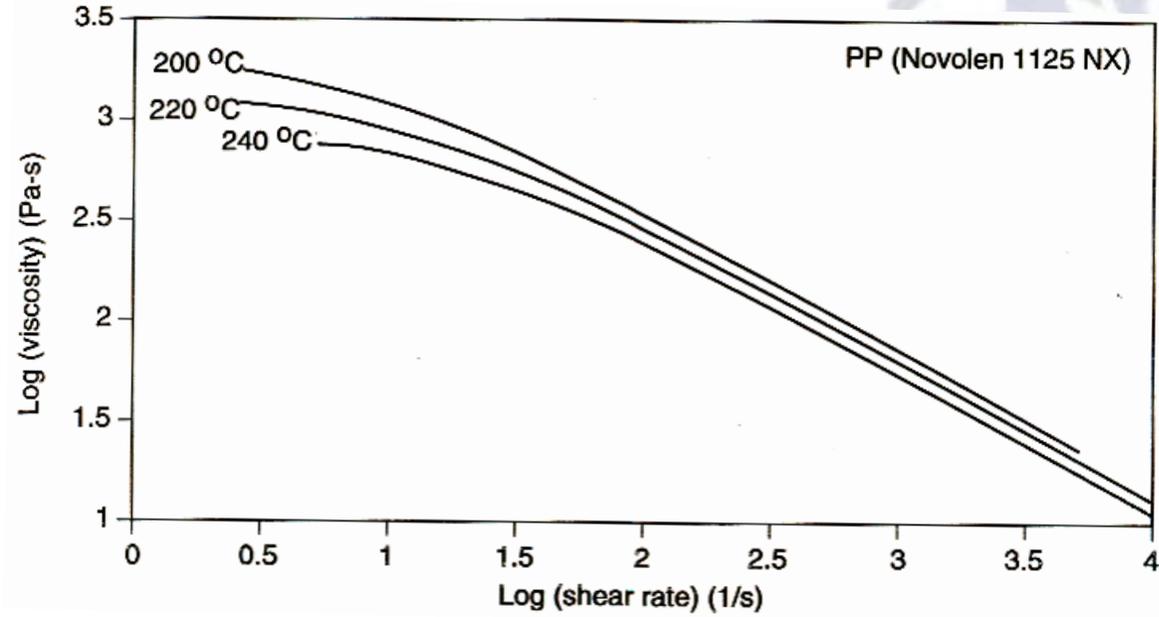
$\eta \text{ è } f(T)$



$\eta = f(T)$



$\eta \text{ è } f(T)$



$\eta$  è  $f(M)$

a basso  $\tau$  (newtoniano) per  $M$  bassi

$$\eta \propto M^{3.5}$$

$\Rightarrow$  maggior fluidità

ad alto  $\tau$  (non-newtoniano) per  $M$  alti

$\Rightarrow$  minor fluidità

# Fluido non-newtoniano

per campo ristretto di  $\dot{\boldsymbol{\tau}}$  vale la legge di potenza:  $\boldsymbol{\eta}_a = \mathbf{C} \cdot \dot{\boldsymbol{\gamma}}_a^{n-1}$

grandezze *apparenti*, calcolate come se il fluido fosse newtoniano

$n$ : indice della legge di potenza

$$n = 0.2 \div 0.5$$

alta velocità di flusso

$$n = 0.75 \div 1$$

bassa velocità di flusso

$$\boldsymbol{\eta}_a = \boldsymbol{\eta}_a^o \cdot \left| \frac{\dot{\boldsymbol{\gamma}}_a}{\dot{\boldsymbol{\gamma}}_a^o} \right|^{n-1} \quad \text{con } \dot{\boldsymbol{\gamma}}^o = 1 \text{ s}^{-1}$$

correzioni per passare da grandezze *apparenti* a quelle *vere* (fluido non-newtoniano)  $\rightarrow$  funzione della geometria del flusso

Sezione costante circolare

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}}_{\text{vera}} = \dot{\boldsymbol{\gamma}}_a \cdot \frac{3n+1}{4n}$$

Sezione costante rettangolare

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}}_{\text{vera}} = \dot{\boldsymbol{\gamma}}_a \cdot \frac{2n+1}{3n}$$

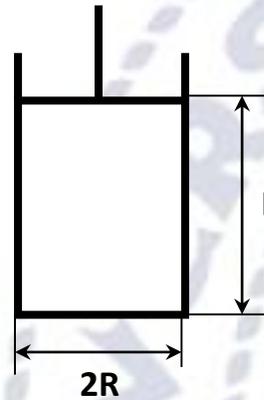
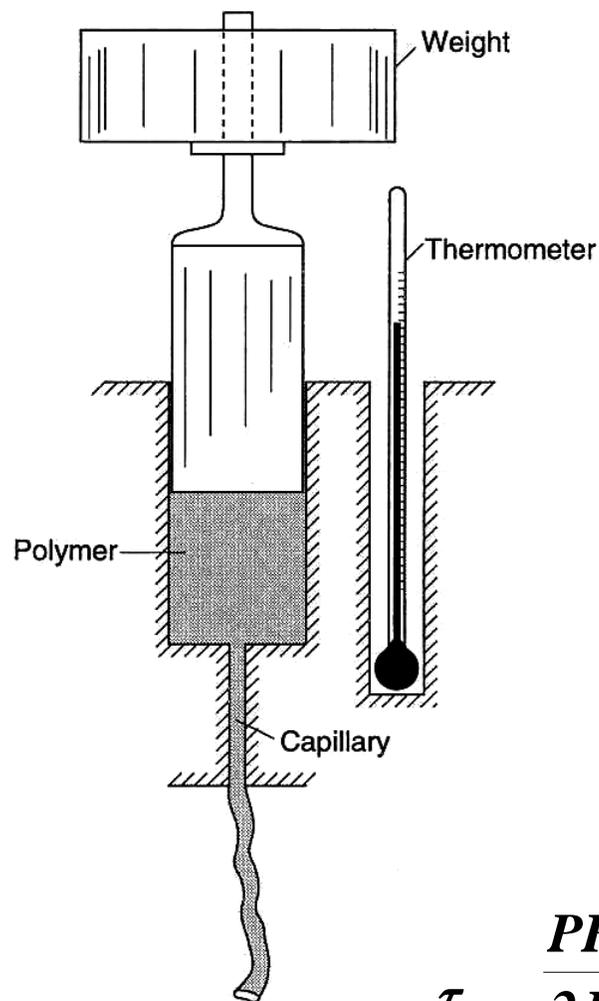
Legge di potenza e indici di consistenza per alcuni polimeri

polimero	C [Pas <sup>n</sup> ]	n	T [°C]
PS	$2,8 \cdot 10^4$	0,28	170
HDPE	$2,0 \cdot 10^4$	0,41	180
LDPE	$6,0 \cdot 10^3$	0,39	160
PP	$7,5 \cdot 10^3$	0,38	200
PA6,6	$6,0 \cdot 10^2$	0,66	290
PC	$6,0 \cdot 10^2$	0,98	300
PVC	$1,7 \cdot 10^4$	0,26	180

⇒ per ogni dato  $\tau$  sarà

$$\eta_{\text{vera}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

grandezze *apparenti*, calcolate come se il fluido fosse newtoniano



Il pistone si muove a velocità costante per dare una portata volumetrica costante ( $Q$ )

Per fluido **newtoniano**:  $\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$

Per fluido reale (non **newtoniano**):  $\tau = \frac{PR}{2L}$

$P$  : caduta di pressione in uscita

$$\eta^* = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\frac{PR}{2L}}{\frac{4Q}{\pi R^3}} = \frac{\pi PR^4}{8LQ}$$

*viscosità di taglio apparente*

Flusso isoterma in un canale di fluido non-newtoniano (legge di potenza)

➤ flusso dovuto a  $\delta P$

- sez. cost. circolare
- sez. cost. rettangolare
- sez. circolare non uniforme

➤ flusso dovuto a trascinamento

**Flusso di pressione** in sezione circolare costante di raggio  $R$  e  $L \gg R$

*Condizioni al contorno*  $v = 0$  per  $r = R$ ;  $v = v_0$  per  $r = 0$   $\frac{\partial v}{\partial r} = 0$  per  $r = 0$

*Distribuzione della velocità*  $v = v_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]$   $v_0 = \frac{n}{n+1} \cdot \dot{\gamma}_0^{\frac{n-1}{n}} \cdot \left[ \frac{1}{2\eta_0} \cdot \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \cdot R^{\frac{n+1}{n}}$

*Portata volumetrica*  $Q = \left( \frac{n+1}{3n+1} \right) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_0$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

*Caduta di pressione*  $\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\eta_0 L}{R \dot{\gamma}_0} \left( \frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8Q}{\pi R^3 \dot{\gamma}_0} \right)^n$

*Velocità di deformazione a parete*  $\dot{\gamma}_{\text{parete}} = - \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \cdot \frac{4Q}{\pi R^3}$

*Taglio a parete*  $\tau_{\text{parete}} = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}_{\text{parete}}$

Flusso di pressione in sezione rettangolare costante di spessore H, larghezza  
 $W \gg H$  e lunghezza  $L \gg H$

Condizioni al contorno  $v = 0$  a  $x = \pm H/2$   $v = v_0$  a  $x = 0$

Distribuzione della velocità 
$$v = v_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2x}{H} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] v_0 = \frac{n}{n+1} \cdot \dot{\gamma}_0^{\frac{n-1}{n}} \cdot \left[ \frac{1}{\eta_0} \cdot \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \cdot \left( \frac{H}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}}$$

Portata volumetrica  $Q = \left( \frac{n+1}{2n+1} \right) \cdot W \cdot H \cdot v_0$

$$Q = \frac{WH^3}{12\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

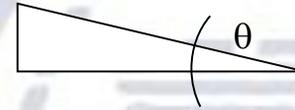
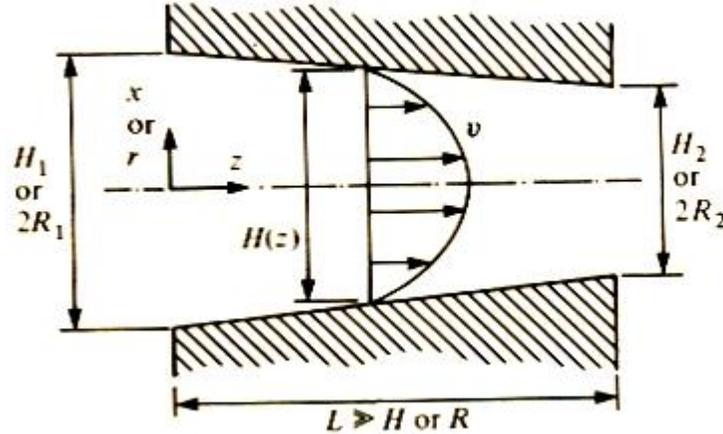
Caduta di pressione  $\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{2\eta_0 L}{H \dot{\gamma}_0^{n-1}} \left( \frac{2n+1}{3n} \cdot \frac{6Q}{H^2} \right)^n$

Velocità di deformazione a parete  $\dot{\gamma}_{\text{parete}} = - \left( \frac{3n+1}{n} \right) \cdot \frac{2Q}{WH^2}$

Taglio a parete  $\tau_{\text{parete}} = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}_{\text{parete}}$

sezione non uniforme

Flusso di pressione



Viscosità di trazione  $\lambda$

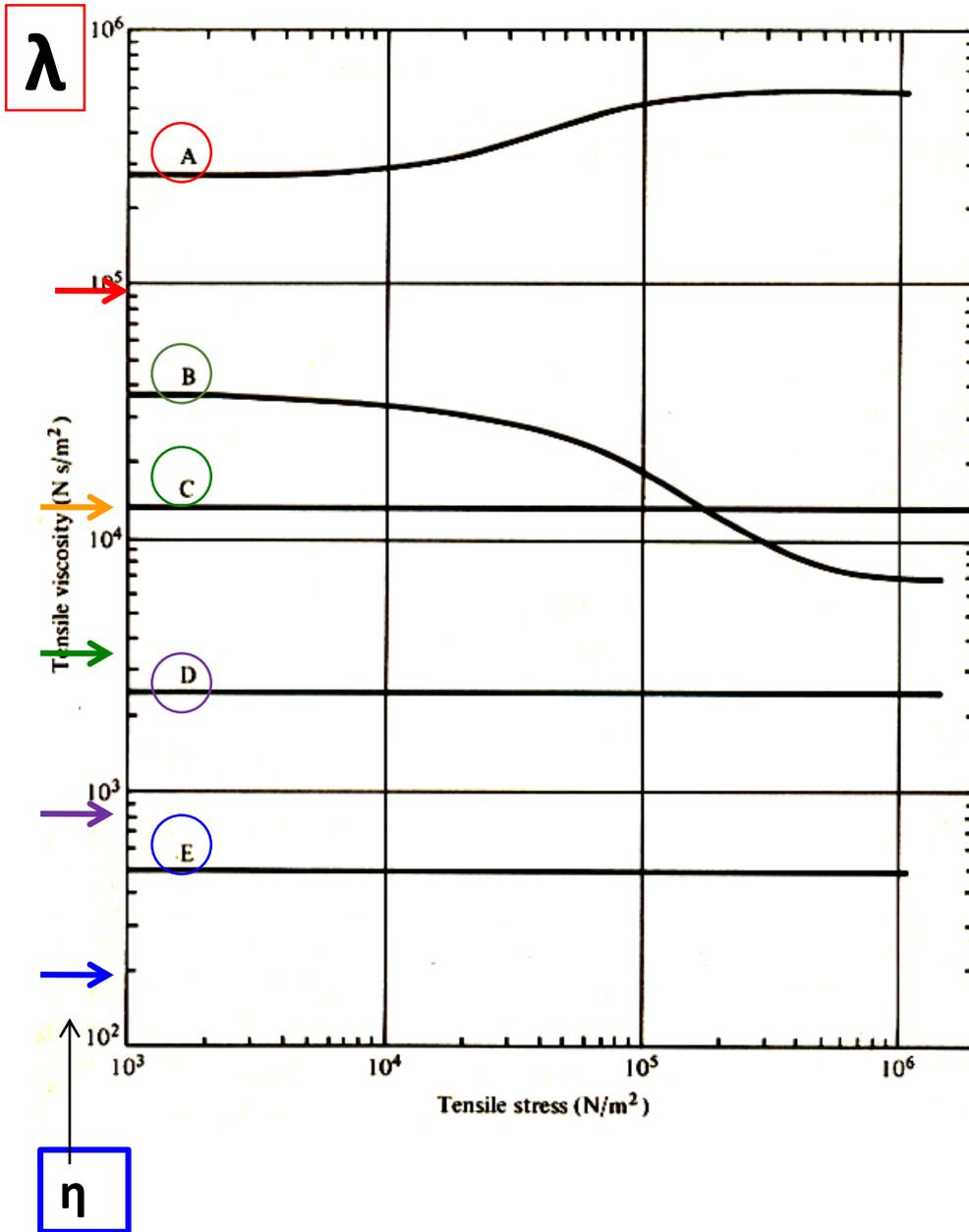
Esistono **due** effetti, uno dovuto al **taglio** e uno dovuto alla **trazione**

dovuta al taglio  $\delta P_{\text{taglio}}$  
$$\Delta P_{\text{taglio}} = P_2 - P_1 = \frac{2\tau_1}{3n \text{tg}\theta} \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^{3n} \right)$$

dovuta alla trazione  $\delta P_{\text{trazione}}$  
$$\Delta P_{\text{trazione}} = P_2 - P_1 = \frac{2\sigma_1}{3} \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^3 \right)$$

Considerando l'effetto composto, ad un certo z sarà:

$$P_z = P_{\text{taglio } z} + P_{\text{traz. } z}$$



Viscosità di trazione  $\lambda=f(\text{stress})$

A: dilatante

B: pseudoplastico

C, D, E: troutoniani (costante)

$$\lambda \gg \eta$$

$\Rightarrow$  anche per bassa velocità di deformazione a trazione (comparata con la velocità di deformazione a taglio),

lo stress associato può essere molto alto

A: LDPE 170°C

B: PP-PE 230°C

C: poliacrilato 230°C

D: copolim. acetalico 200°C

E: PA6,6 285°C

## flusso dovuto a trascinamento

Nei casi precedenti di flusso dovuto a pressione, l'asse neutro degli stress era quello mediano.

Nel flusso dovuto a trascinamento, per fluido non-newtoniano, non si conosce a priori la posizione dell'asse neutro

⇒ non è possibile una trattazione analitica

### Caso particolare:

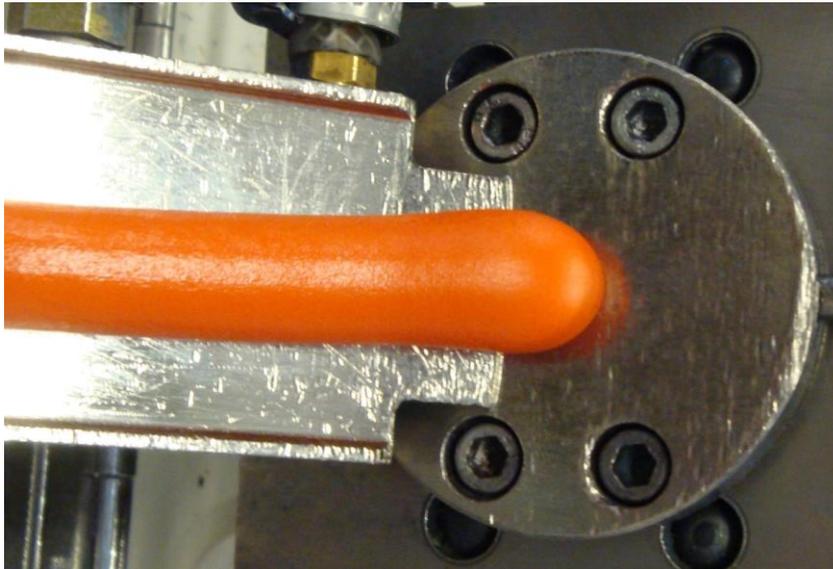
flusso tra due cilindri rotanti di uguale dimensione e stessa velocità di rotazione → calandratura

in questo caso si assume un comportamento newtoniano

# Comportamento elastico

Il recupero elastico avviene alla rimozione del carico!

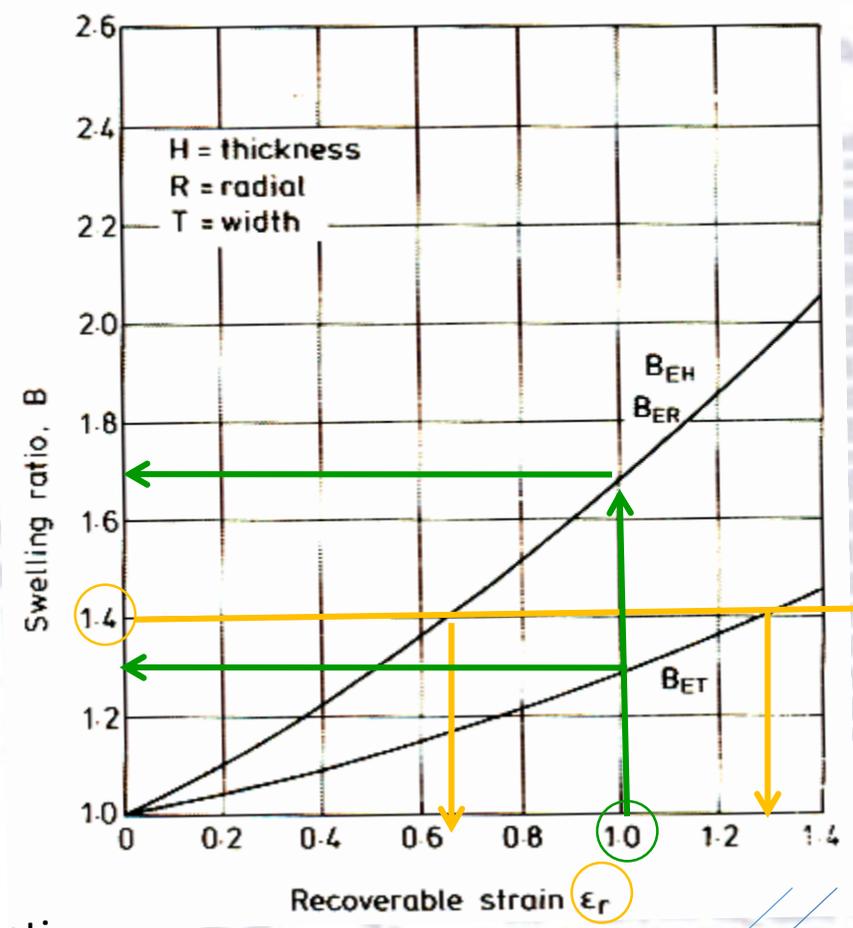
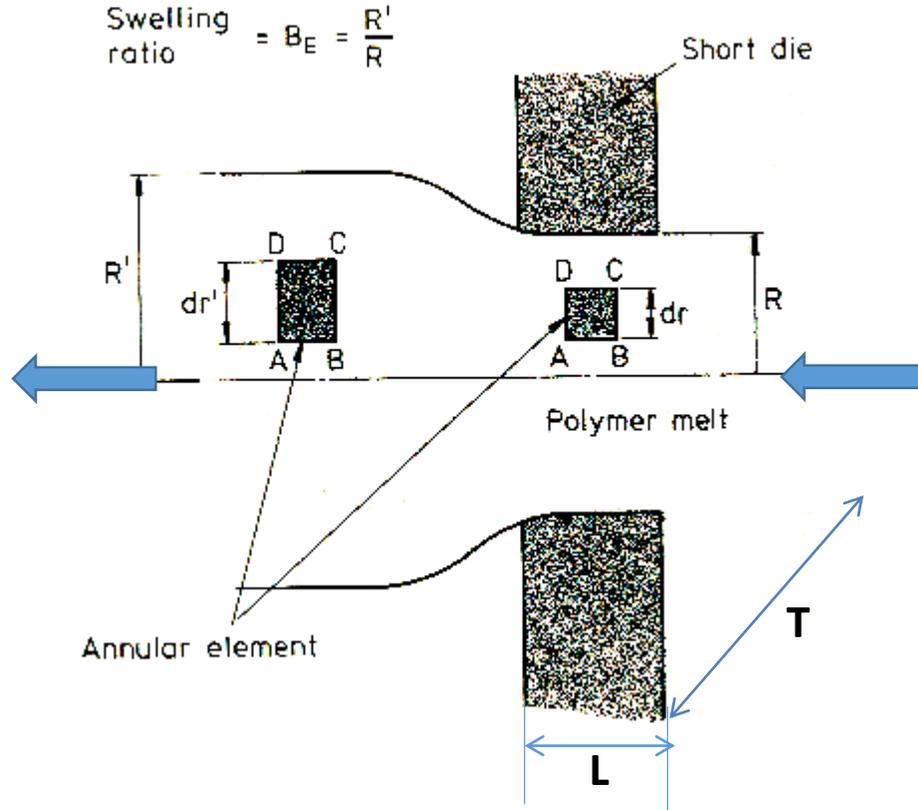
In uscita dallo stampo/estrusore ci sarà un allargamento dimensionale



Rapporto di rigonfiamento

$$B = \frac{D_{\text{estruso}}}{D_{\text{stampo}}}$$

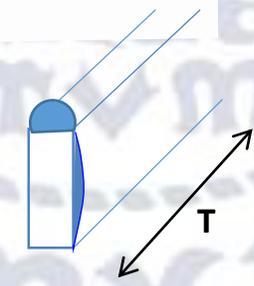
# Canale corto



$B_{ER}$  dovuto a  $\sigma$  per sezioni circolari costanti

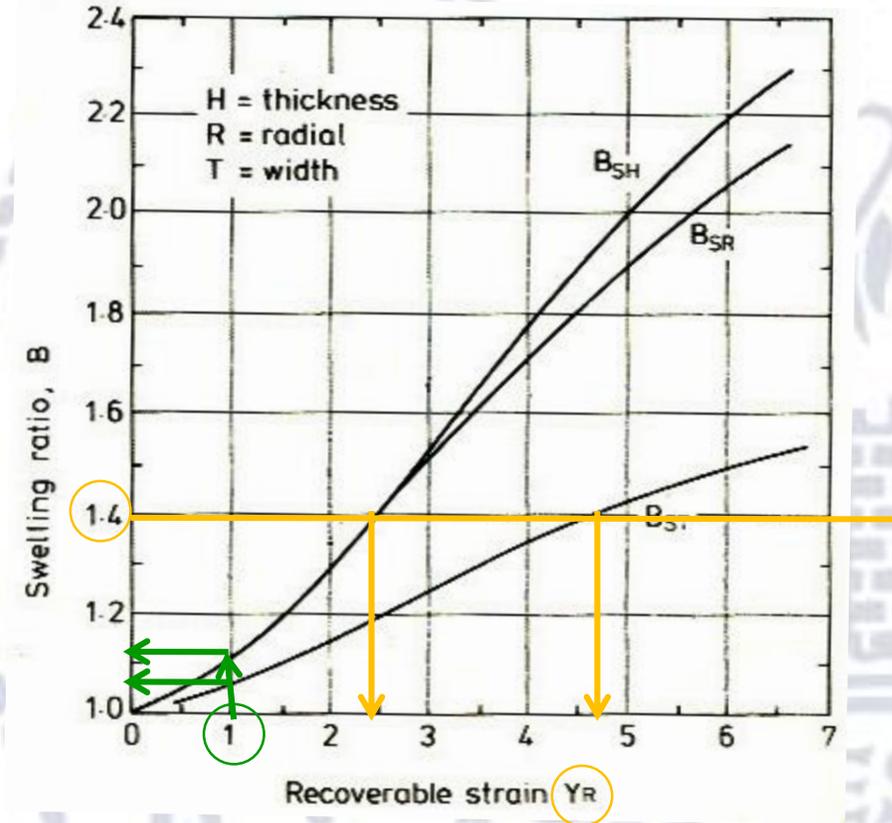
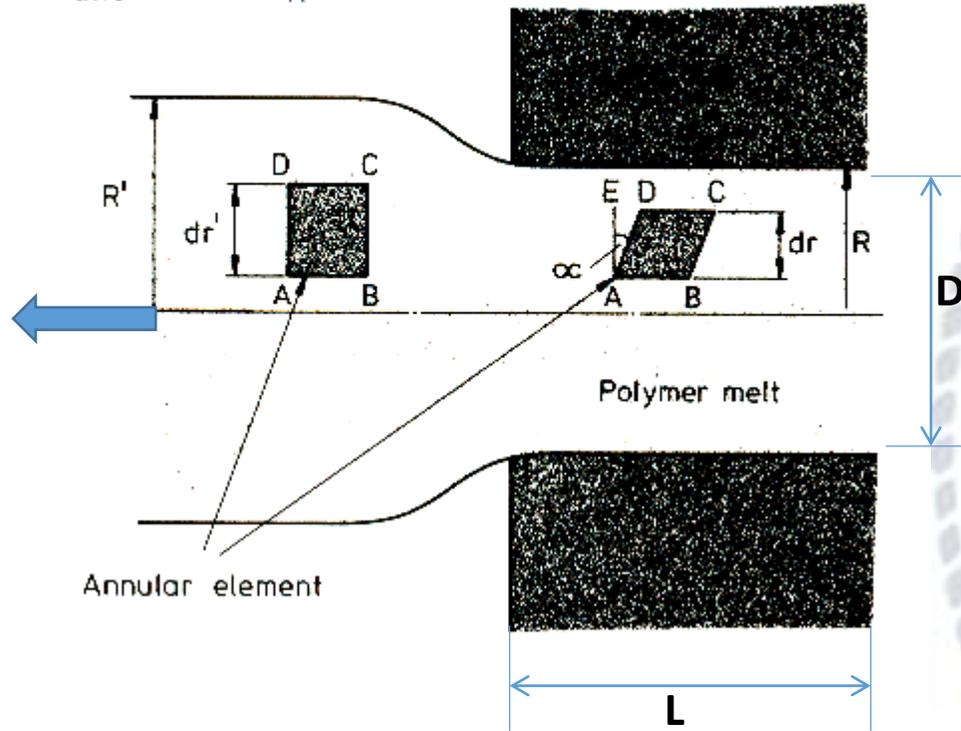
$B_{EH}$  dovuto a  $\sigma$  per sezioni rettangolari costanti (HxT)

Per condotte corte risulta  $B_{EH} = B_{ET}^2$   $B_{EH} = (e^{\epsilon_R})^{1/2}$   $B_{ET} = (e^{\epsilon_R})^{1/4}$



# Canale lungo

Swelling ratio =  $B_s = \frac{R'}{R}$

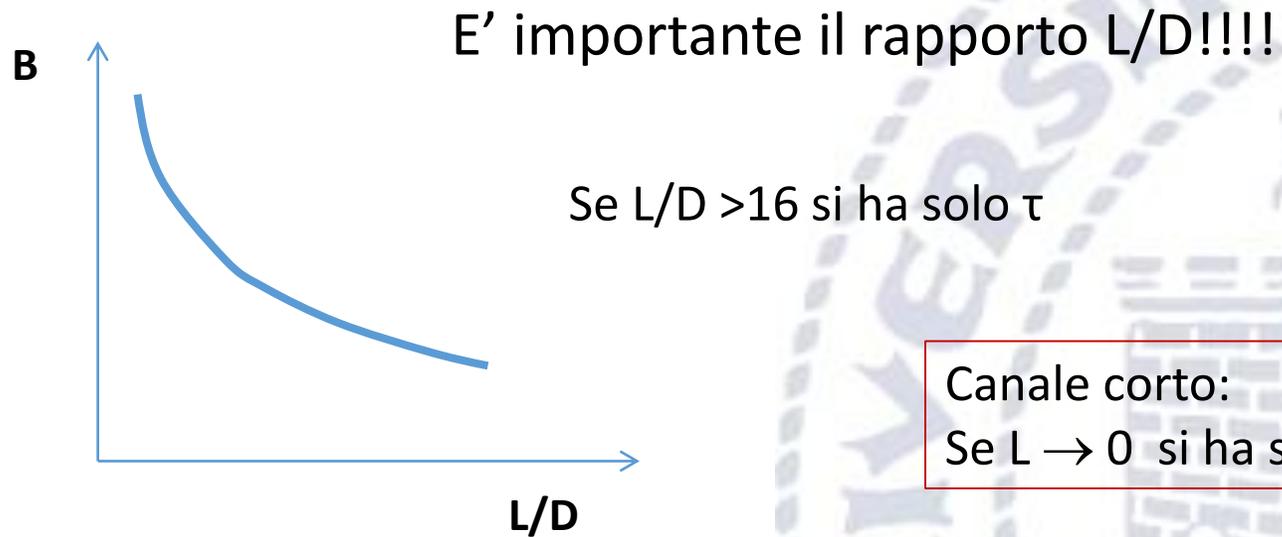


$B_{SR}$  dovuto a  $\tau$  per sezioni circolari costanti

$B_{SH}$  dovuto a  $\tau$  per sezioni rettangolari costanti ( $H \times T$ )

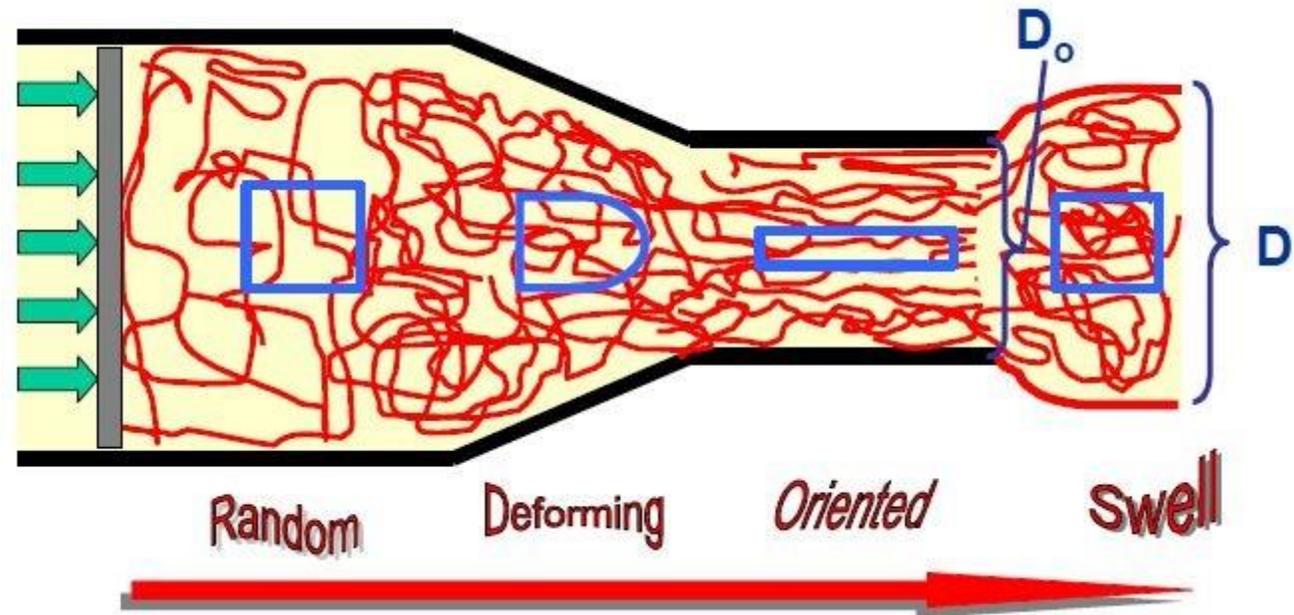
Per condotte lunghe risulta

$$B_{SH} = B_{ST}^2$$

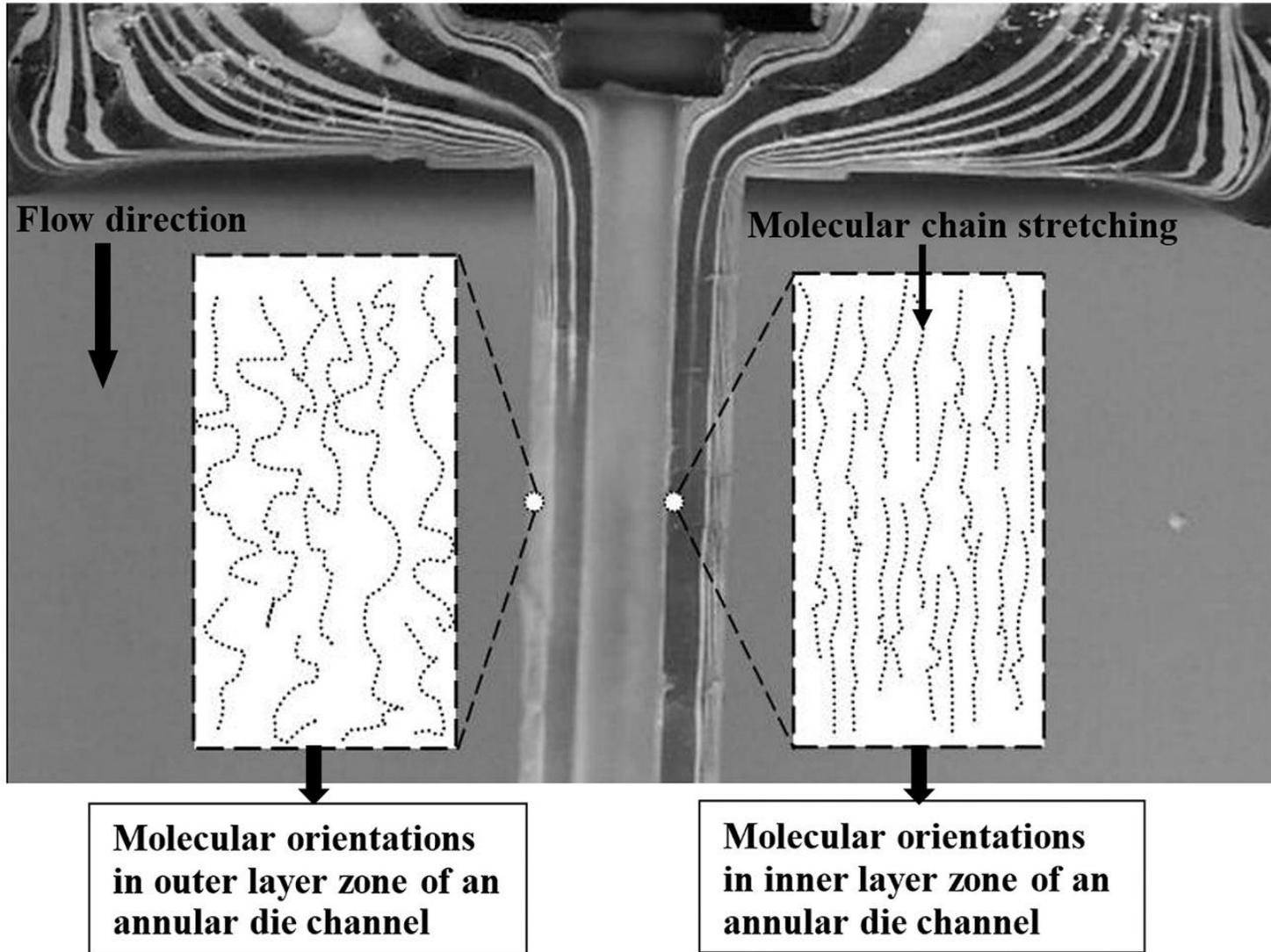


Canale corto:  
Se  $L \rightarrow 0$  si ha solo  $\epsilon$

Il recupero elastico, e quindi il fenomeno di rigonfiamento è più marcato nel caso di canale corto!



Il recupero elastico, e quindi il fenomeno di rigonfiamento è più marcato nel caso di canale corto!



Come determinare il raggio finale di barra estrusa data una portata Q?

Dati: Q, P, parametri geometrici ugello (D=2R, L)

→ calcolo delle grandezze apparenti

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad \eta_a = \frac{\pi P R^4}{8LQ}$$

⇒ da grafico  $\eta_a$  vs.  $\tau \rightarrow \tau$

Da curve sperimentali G vs.  $\tau \rightarrow G$  e.:

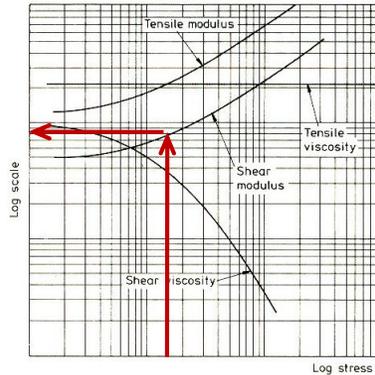
$$\gamma_R = \frac{\tau}{G}$$

Da  $\gamma_R$  si determina B e.:  $R' = R_{\text{finale}}$

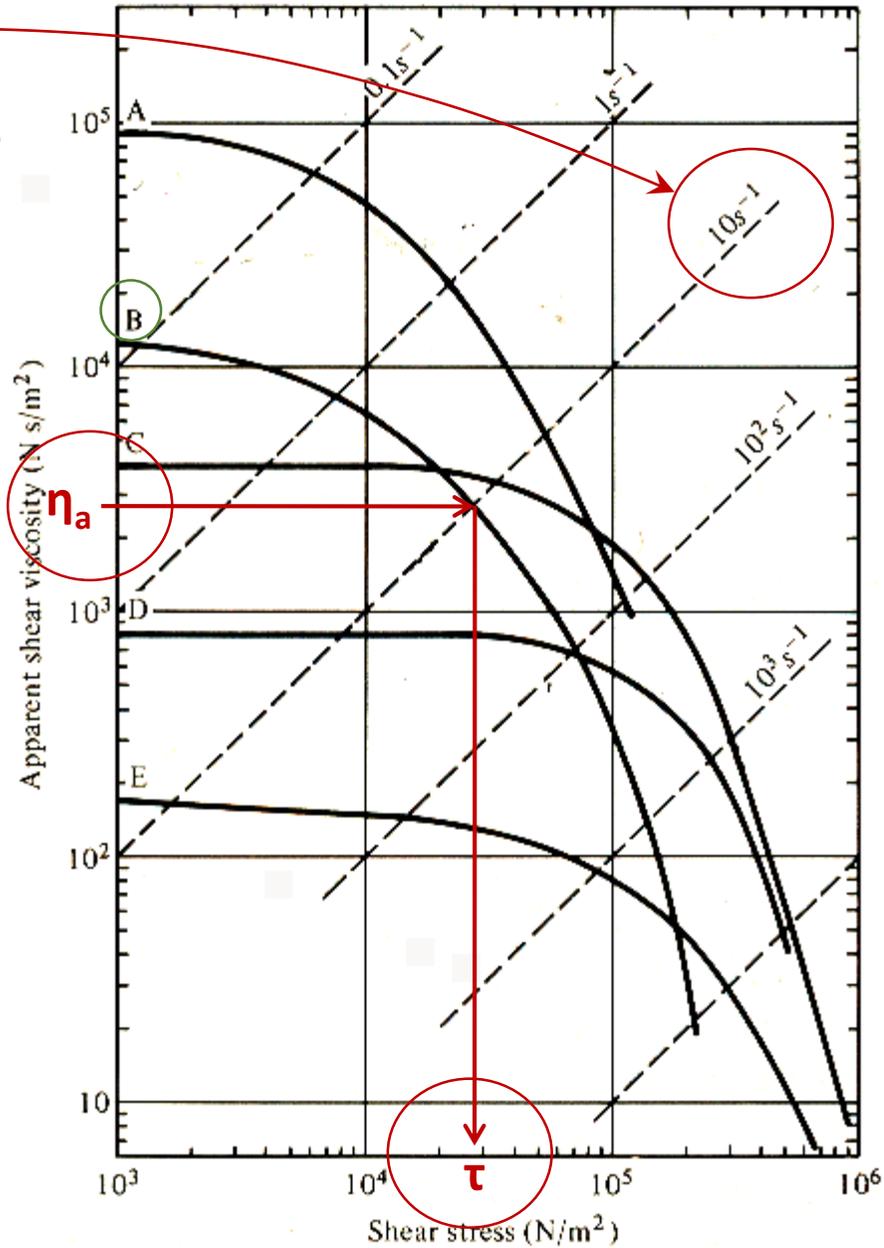
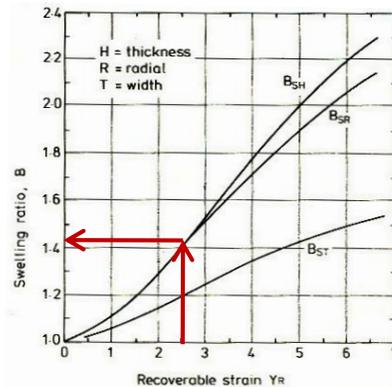
Data la portata  $Q \rightarrow \dot{\gamma}_a = \frac{4Q}{\pi R^3}$

Da curve sperimentali:  
da  $\tau \rightarrow G$

$$\gamma_R = \frac{\tau}{G}$$



Da  $g_R$  si determina B e.:  $R' = R_{\text{finale}}$



Per i materiali viscoelastici esiste un tempo di rilassamento  $t_0 = \eta/E$

Per stimare l'importanza della componente elastica in un flusso, si utilizza il numero di Deborah (De):

$$De = t_0/t_p$$

ove  $t_p$  è il tempo caratteristico del processo

p.es.  $t_p = v/Q$

$De = 0 \rightarrow$  prevale la componente viscosa (fluido viscoso)

$De = \infty \rightarrow$  prevale la componente elastica (solido elastico)

$t_p > t \rightarrow$  cresce effetto viscoso (*blow moulding*)

$t_p < t \rightarrow$  domina effetto elastico (*termoformatura*)

# Trasferimento di CALORE

→ FUSIONE

→ SOLIDIFICAZIONE

→ CONTROLLO T

} trasformazioni di stato

- in riscaldamento
- in trasporto fuso
- in raffreddamento
- durante processi di reticolazione
- durante reazioni di espansione (schiume)

! apparecchiature elettriche (pompe, motori,...) riscaldatori bagni di raffreddamento

⇒ COSTI    PRODUTTIVITA'    QUALITA'

# Processi di trasferimento di calore

## Conduzione

Q: flusso termico attraverso area A sotto gradT

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

k: conduttività termica [W/mK]

$$k \sim 0,2 \text{ W/mK}$$

→ stampi

## Convezione

T<sub>s</sub> temperatura della superficie del polimero

T<sub>0</sub> temperatura dell'ambiente

$$Q = h A (T_s - T_0)$$

h: coeff. di trasf. termico [W/m<sup>2</sup>K]

→ fuso

→ estruso

## Irraggiamento

Corpo nero di area A a temperatura T

$$Q = A\sigma T^4$$

s = cost = 5,72 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>

→ film sottili

condizioni di trasferimento termico

*stato stazionario:*

in opera

⇒ quasi sempre

durante processo di formatura

⇒ MAI - casi particolari

⇒ *stato non stazionario*

*caso più frequente durante i processi di formatura*

in genere si ha:

- $T_{\text{superficiale}}$  imposta
- reazione chimica esotermica (reticolazioni)
- polimero in movimento
- trasformazioni di stato  $S \rightarrow L$  (endo)  $L \rightarrow S$  (eso) cristallizzazioni (eso)

Si applicano: principi di conservazione di energia // di momento // di massa

## Polimero statico – trasferimento Q in condizioni stazionarie

### assunzioni:

corpo uniforme, isotropo con proprietà costanti in DT

- trasferimento per conduzione

$$q = -k \text{ grad}T$$

$k = 0,15 \div 0,45 \text{ W/mK}$  (**bassa!!!**)

$\Rightarrow$  anche per elevati gradT  $q$  è modesto

- raffreddamento corpo solido ( $T_s$ ) in fluido ( $T_f$ ) per convezione

$$q = h (T_s - T_f)$$

## Valori tipici del coefficiente di trasferimento termico

<i>situazione</i>	<i>h [W/m<sup>2</sup>K]</i>
Polimero in aria ferma	10
Polimero in aria a 25 km/h	30 – 40
Polimero solido contro superficie metallica	250 – 500
Polimero contro bagno d'olio	400 – 600
Polimero contro acqua agitata	1500 – 3000
Polimero fuso ad alta pressione contro superficie metallica (contatto termico perfetto)	>10 000

Quale fenomeno domina? Conduzione o convezione?

n. di Biot (adimensionale)  $\mathbf{Bi} = \frac{\mathbf{h} \cdot \mathbf{x}}{\mathbf{k}}$

$x = H$  se trasferimento solo su 1 faccia (lastre | | spessore  $H$ )

$= \frac{1}{2} H$  se trasferimento su 2 facce

$= R$  (cilindro di raggio  $R$ )

Dato un corpo che si raffredda in un ambiente, nel corpo si ha conduzione, tra il corpo e l'ambiente si ha convezione

in condizioni stazionarie :

flusso di calore nel corpo = flusso di calore tra corpo e ambiente,

$$k(T_{\text{centro}} - T_{\text{sup}}) / H = h(T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}})$$

ovvero

$$Bi = (T_{\text{centro}} - T_{\text{superficie}}) / (T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}})$$

$$Bi = \frac{h \cdot x}{k}$$

Quindi, se il gradiente di temperatura presente NEL corpo ( $T_{\text{centro}} - T_{\text{superficie}}$ ) è molto più piccolo della differenza ( $T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}}$ ), allora il raffreddamento è limitato dalla convezione

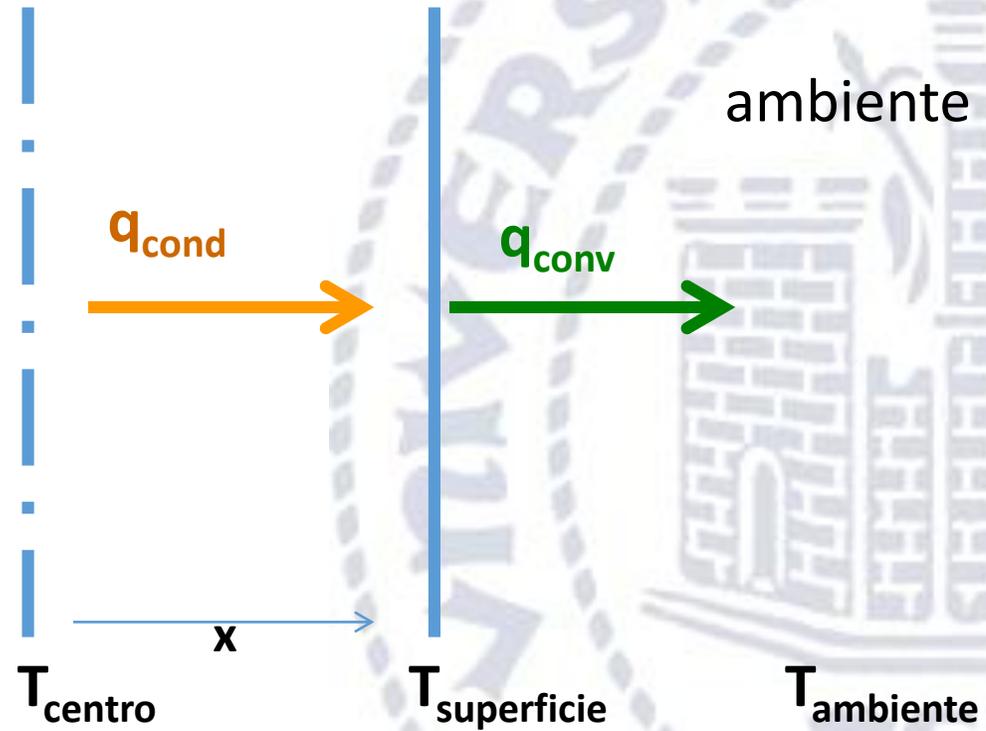
Ovvero:

se  $Bi \ll 1$  domina la convezione

Se invece il gradiente di T NEL corpo è molto più grande di quello tra la superficie e l'ambiente, allora il raffreddamento è limitato dalla conduzione

Ovvero:

se  $Bi \gg 1$  domina la conduzione



Equilibrio = condizioni stazionarie  $q_{\text{cond}} = q_{\text{conv}}$

Per i **metalli** generalmente il raffreddamento è limitato dalla *convezione*  $Bi \ll 1$

Nel caso dei **polimeri** invece, nella maggior parte dei casi

$Bi > 1 \Rightarrow$  *conduzione*

Solo per raffreddamento di *film polimerici in aria*

$Bi < 1$  in quanto  $x$  è molto piccolo

*film in aria*  $\Rightarrow$  *convezione/irraggiamento*

Il trasferimento di Q durante il processo può avvenire in condizioni di polimero

→ statico

→ in movimento

in stampi : → CONDUZIONE

in fuso: → convezione

in raffreddamento (aria) → convezione

raffr. film sottili → *irraggiamento*

ai bordi: → riscaldamento per flusso viscoso

Da tenere in considerazione il CALORE generato internamente

durante → reticolazioni

→ cristallizzazioni

# Trasferimento Q in condizioni non stazionarie

Per la maggior parte dei processi T varia con  $t$  e con posizione

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \alpha \nabla^2 \mathbf{T}$$

*laplaciano*

$\alpha$ : diffusività termica

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial z^2} \right)$$

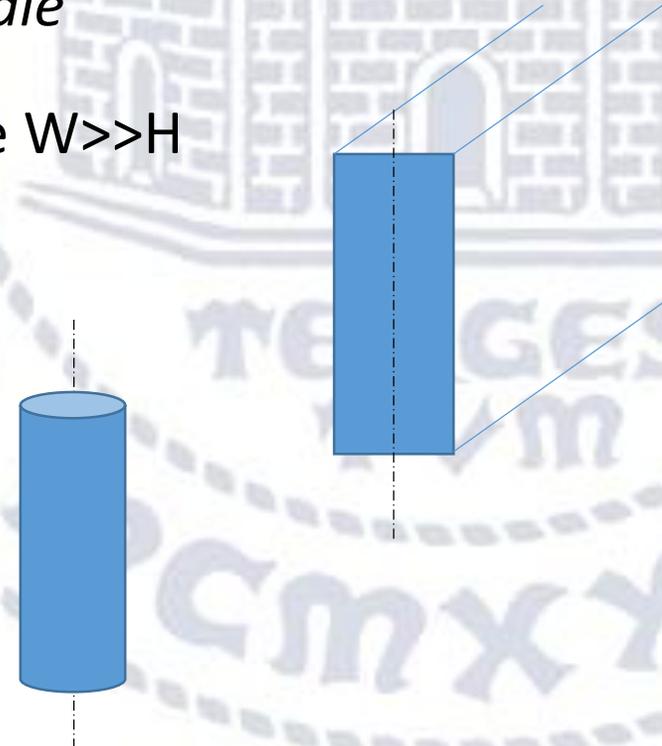
**Caso particolare:** flusso di calore *unidirezionale*

- lastre piane parallele di spessore  $x = 2H$  e  $W \gg H$

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial x^2}$$

- cilindro di raggio R costante

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial r} \right)$$



## condizioni al contorno - raffreddamento

- 1) variazione improvvisa di  $T_s$  a  $t = 0$
- 2) tempra in fluido di  $T_f$  a  $t = 0$

$$T_s, T_f < T_0 \quad T_{\text{iniziale}}$$

valutazione grafica in funzione di *numeri adimensionali*

n° di Fourier

$$Fo = \frac{\alpha t}{H^2} \quad \frac{\alpha t}{R^2}$$

distanza adimensionale

$$\xi = \frac{x}{H} \quad \frac{r}{R}$$

temperatura adimensionale  $Y = f(\text{condizioni al contorno})$

$$Y_1 = \frac{T(x,t) - T_s}{T_0 - T_s} \quad \text{solo conduzione, } T_0 = T_{\text{iniziale}} \text{ uniforme}$$

$$Y_2 = \frac{T(x,t) - T_f}{T_0 - T_f} \quad \text{conduzione + convezione}$$

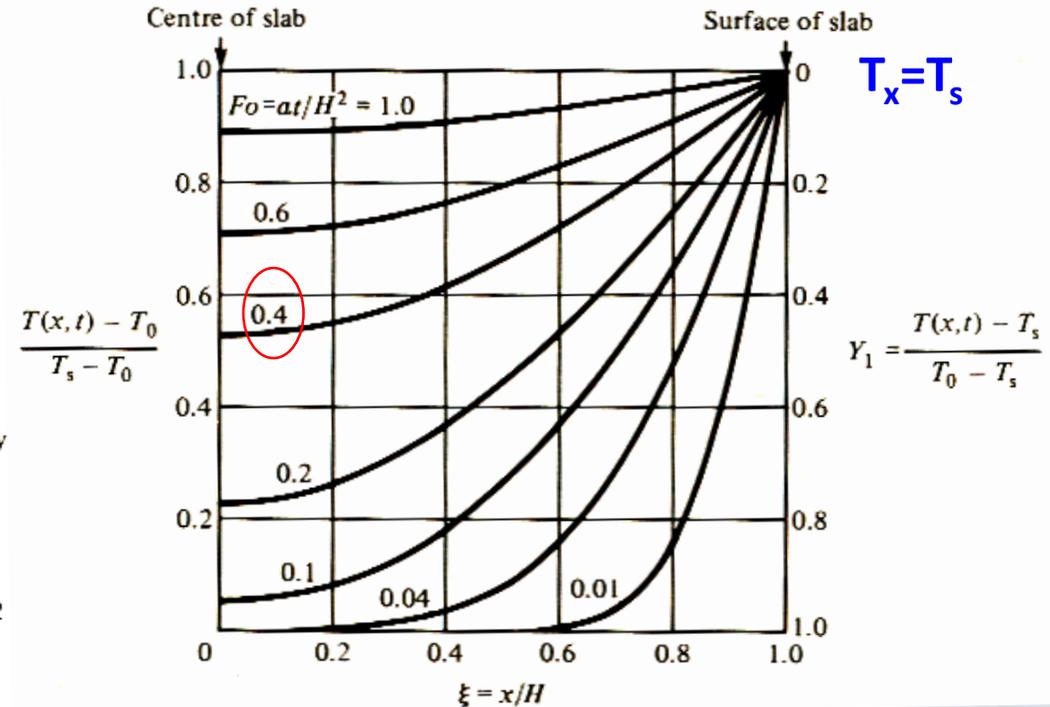
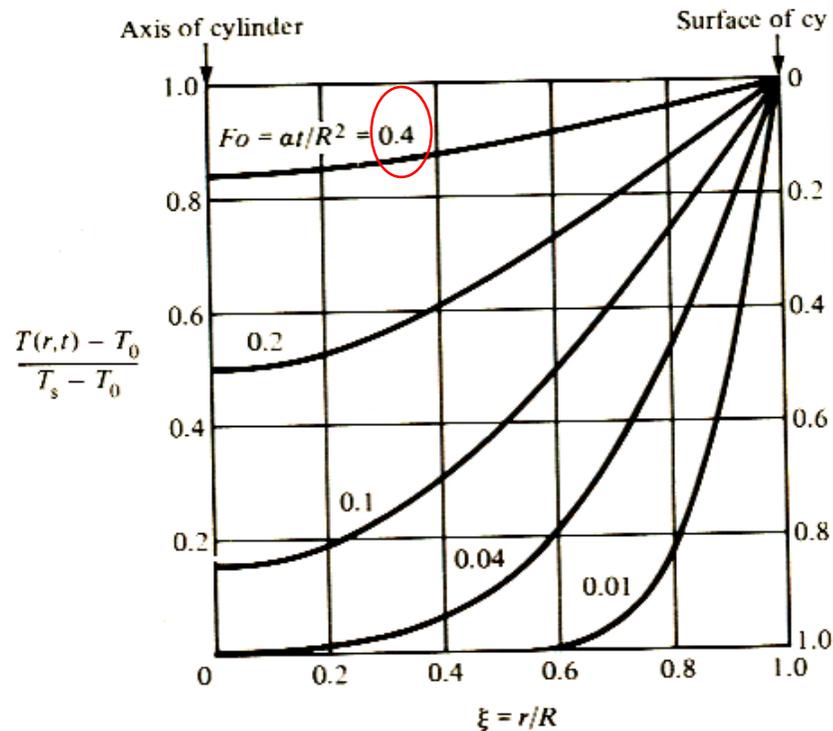
condizioni al contorno 1)

$(Fo, Y_1, \xi)$

solo conduzione

✓lastre piane parallele

✓cilindro



Il centro impiega più tempo a raggiungere la Teq ( $Y \rightarrow 0$ )

Un cilindro equilibra prima di lastre

|| !!!

condizioni al contorno 2) (Fo, Y<sub>2</sub>, ξ, Bi)

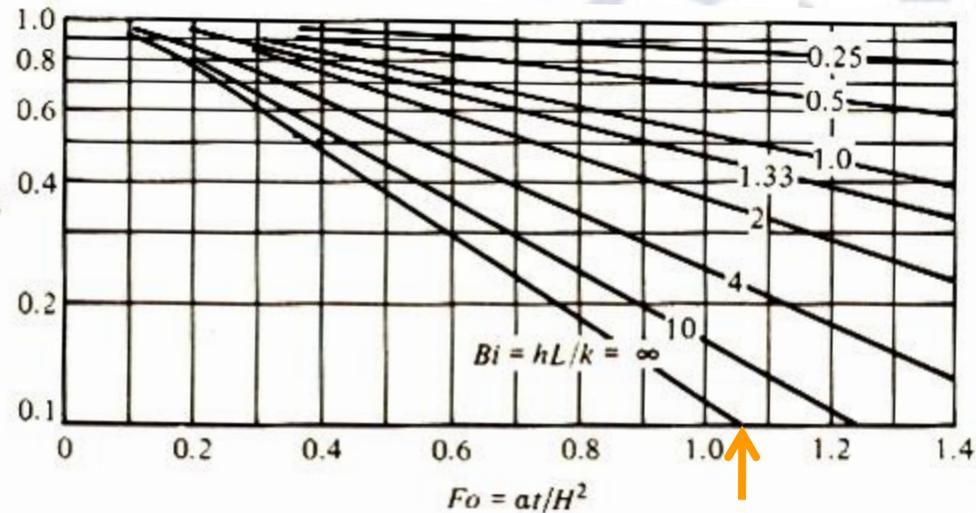
conduzione + convezione

✓ lastre piane parallele

x = 0 centro

$$Y_2 = \frac{T(x,t) - T_s}{T_0 - T_s}$$

Una data T (Y) è raggiunta prima (<Fo) quanto > è Bi (conduz. > di convez.)

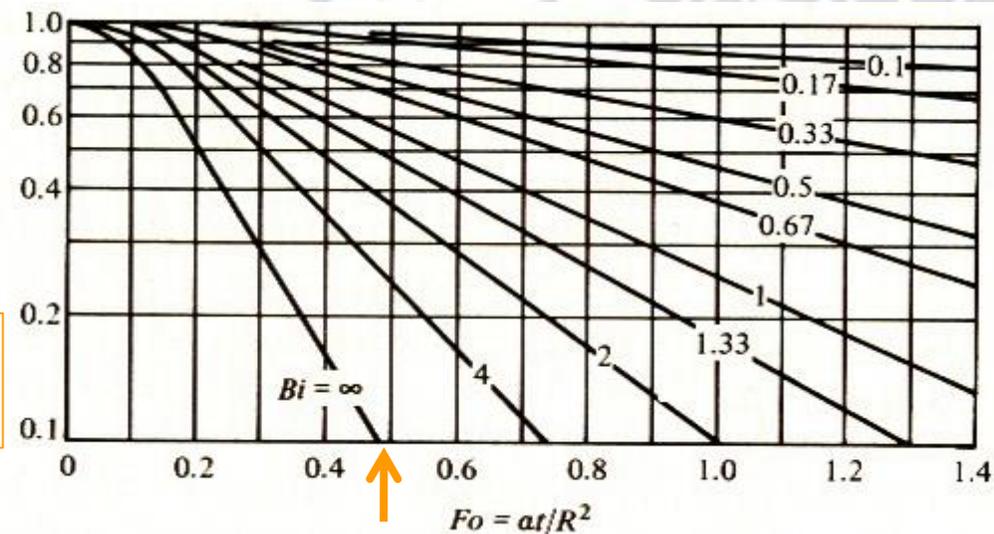


✓ cilindro

x = 0 centro

$$Y_2 = \frac{T(r,t) - T_s}{T_0 - T_s}$$

Un cilindro equilibra prima di lastre | | !!!



Bi=∞ conduzione pura

## Non applicabile se:

1. contatto termico non perfetto (es. ritiro in stampo)
2. densità o altre proprietà variano molto nel  $\delta T$
3. cambiamenti di stato durante il raffreddamento (cristallizzazione) o durante il riscaldamento (fusione)
4. calore generato internamente nel  $\delta t$  (reticolazione, dissipazione viscosa)
5.  $T_0$  non è uniforme (sezioni spesse)

## Ipotesi di flusso isoterma valide se:

1. flussi lenti in filiera (con T del fuso)
2. raffreddamento di estrusi in bagno d'acqua, in assenza di tensioni residue
3. riscaldamento di gomme o termoindurenti per compressione a caldo

In tutti gli altri casi si deve considerare un flusso  
**non isoterma**

se ALTI FLUSSI → dissipazione viscosa

# Flusso non isoterma non stazionario

Analisi dell'importanza relativa dei vari effetti attraverso gruppi adimensionali

I fattori di maggior interesse sono valori caratteristici di:

$t$  taglio medio

$\dot{\gamma}$  velocità di deformazione media

$2R$  o  $H$  dimensione del flusso

$v$  velocità media

$b$  coefficiente di temperatura della viscosità

$n^\circ$  di Griffith  $G = \frac{b\tau\dot{\gamma}H^2}{k}$  dissipazione viscosa - conduzione

$n^\circ$  di Brinkman  $Br = \frac{\tau\dot{\gamma}H^2}{b(T_b - T_0)}$  dissipazione viscosa -  $(T_{\text{bordo}} - T_0)$

se  $G, G/Br \ll 1$  il sistema si può considerare **isoterma**

= poca dissipazione viscosa

$$b = \ln(a_T) / (T_0 - T)$$

$$\frac{\eta}{\eta_0} = e^{-b(T - T_0)}$$

n° di Graetz  $Gr = \frac{\rho C_p v H^2}{kL}$  convezione – conduzione lungo L

se  $Gr \ll 1$  domina la conduzione dal bordo:

il profilo di T non varia lungo L (direzione del flusso)

spesso  $Gr$  è grande  $\Rightarrow$  il profilo di T si sviluppa lentamente lungo L

*Caso particolare:*

se  $G \gg 1$  (alta velocità di flusso tra pareti mantenute a  $T \equiv T_{fuso}$ )

$\Rightarrow$  assunzione di adiabaticità

$Q = portata$

$$Q \cdot dP = Q \cdot r \cdot C_p \cdot dT$$

Tutto il lavoro è trasformato in calore per dissipazione viscosa

Aumento MEDIO di T:

$$T - T_0 = \frac{1}{b} \ln \left[ 1 + \left( \frac{b \Delta P_0}{\rho C_p} \right) \right]$$

MA

alle pareti la  $T_{\text{locale}}$  può essere 3÷5 volte maggiore della MEDIA !!!

⇒ **PERICOLO**

$$\Rightarrow T_{\text{pareti}} < T_{\text{fuso}}$$

- reticolazione non controllata
- degrado

⇒ **qualità del prodotto KO!!!!**

Flusso non isoterma non stazionario

Bilancio energetico:

velocità aumento energia termica +

velocità aumento energia per conduzione +

velocità aumento energia per dissipazione viscosa = 0

flusso capillare:

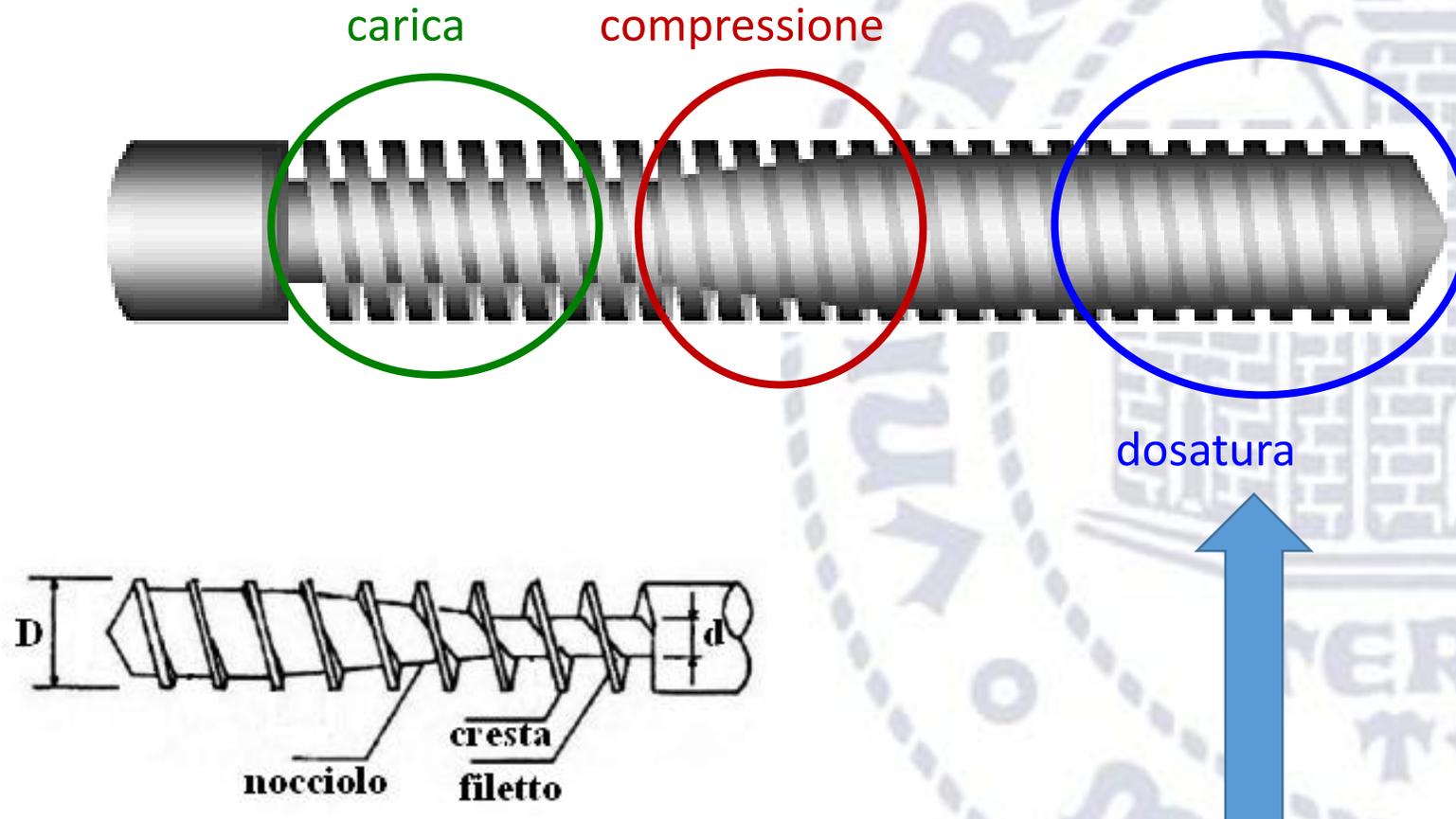
$$\rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\eta_0}{\dot{\gamma}_0^{n-1}} \left( -\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^{n-1} \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2$$

equazione di moto per flusso isoterma

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\eta_0}{\dot{\gamma}_0^{n-1}} \left( -\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^{n-1} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]$$

*risoluzione numerica*

# Analisi del flusso in un estrusore



Ipotesi:  $Q = \text{cost}$   $T = \text{cost}$

⇒ Comportamento di fluido newtoniano



## Parametri geometrici della vite

D: diametro esterno vite

H: altezza filetto  $\rightarrow$  diametro interno vite  $d=D-2H$

L: lunghezza vite

$\phi$ : angolo di inclinazione del filetto

N: velocità rotazione vite (giri/min)

d: luce tra diametro esterno e cilindro

e: larghezza filetto

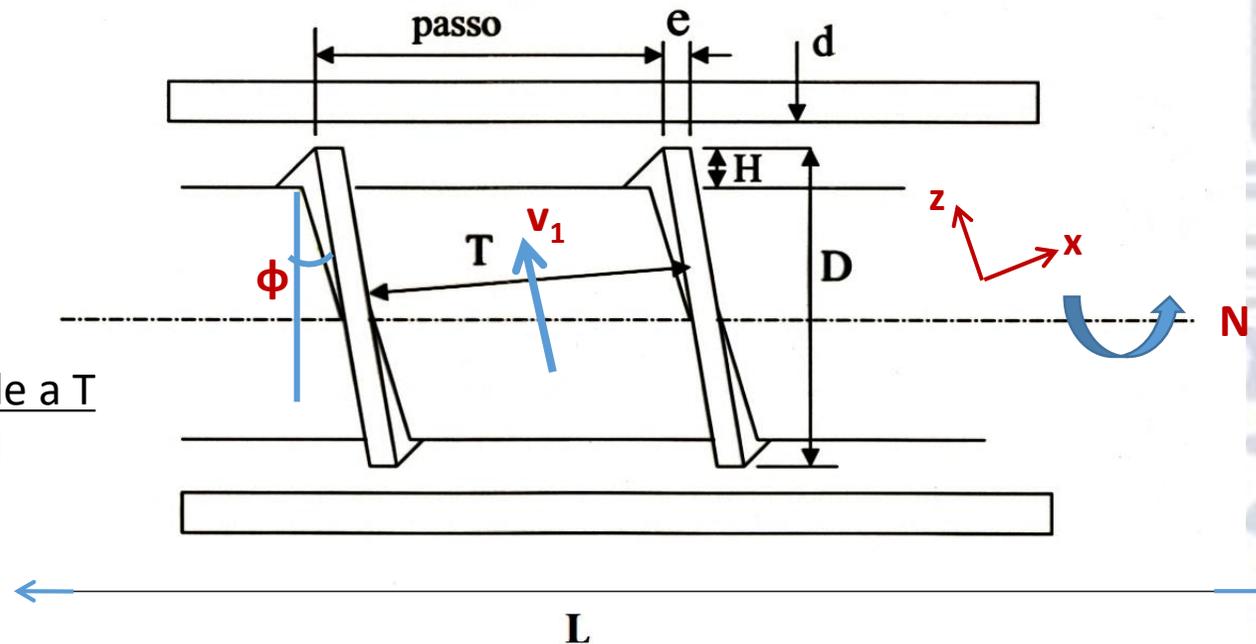
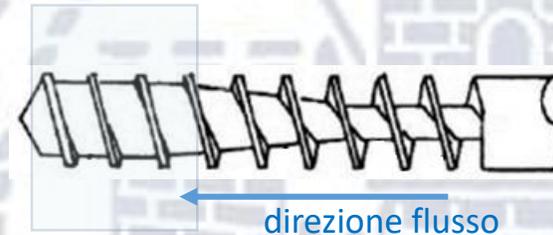
p: passo della vite =  $\pi D \operatorname{tg} \phi$

$$T = (p-e)\cos \phi \cong \pi D \operatorname{sen} \phi$$

$v_1$  = velocità in direzione ortogonale a T

$$v_1 = \text{lunghezza 1 giro} \cdot N = \pi D \cos \phi \cdot N$$

Zona di dosatura:  $d=\text{cost}$



Condizioni: - moto relativo tra le pareti (fisse) e la vite (mobile)  
- presenza di  $\Delta P$

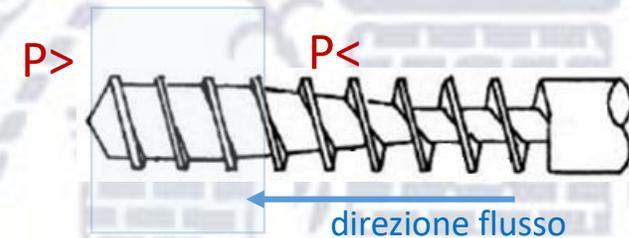
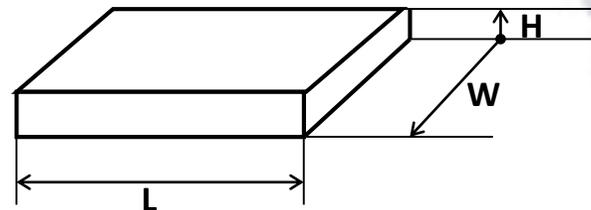
Esistono 3 flussi:

a) di trascinamento (per moto relativo)

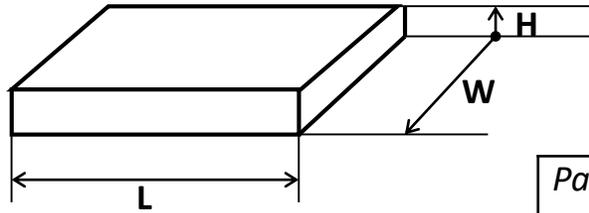
b) di pressione (per  $\Delta P$ )

c) di perdita /fuga (leakage) (riflusso nell'interstizio tra dente di ruota e parete fissa)  $\rightarrow$  flusso di pressione

Caso assimilabile a flusso in una sezione rettangolare



Caso assimilabile a flusso in una sezione rettangolare

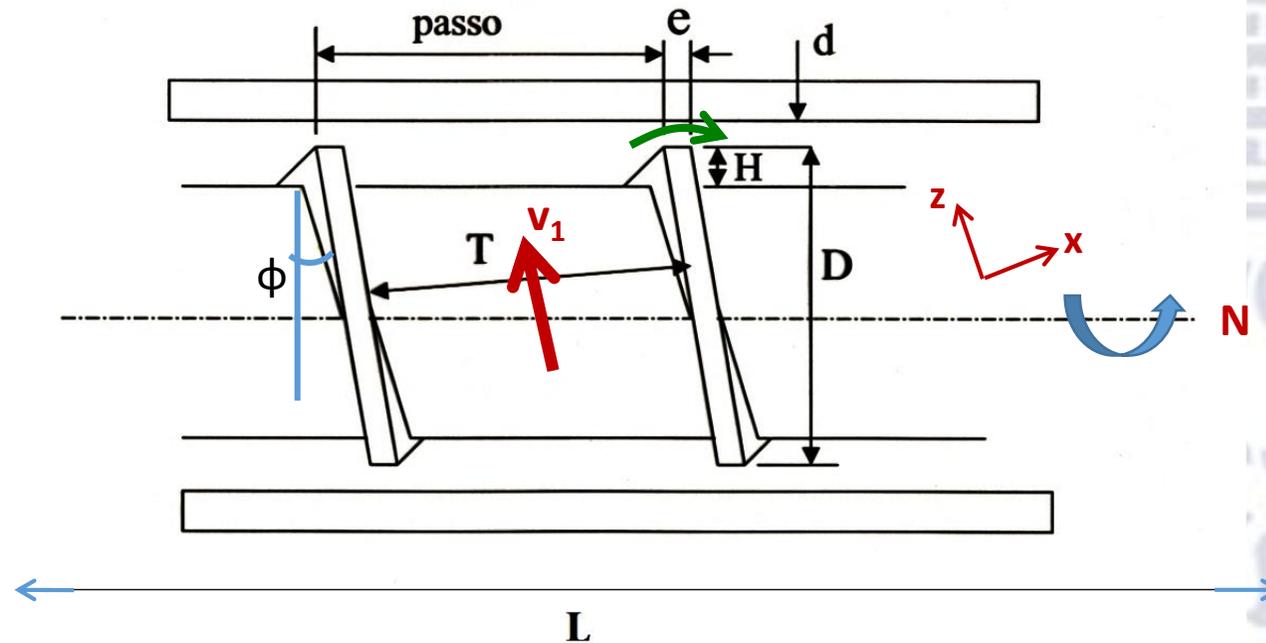


flusso trascinamento e P

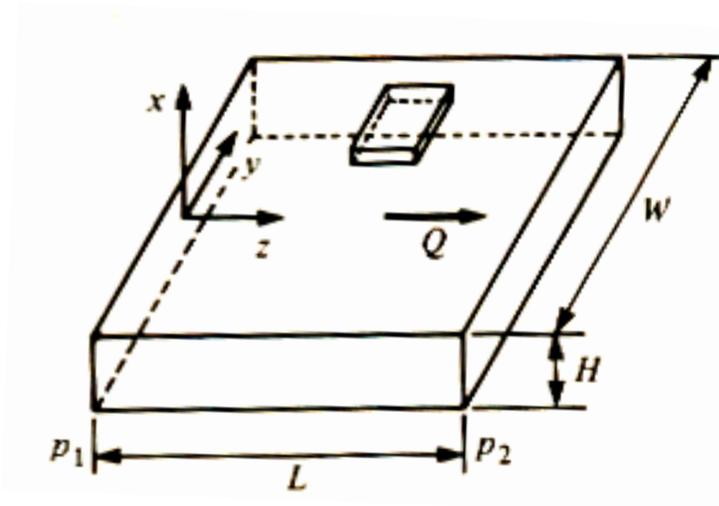
Parametri canale	Parametri vite
$H(x)$	$H$
$W(y)$	$T=(p-e) \cos\phi$
$L(z)$	$L/\sin\phi$

flusso perdita (P)

Parametri canale	Parametri vite
$H(x)$	$d$
$W(y)$	$\pi D/\cos\phi$
$L(z)$	$e \cdot \cos\phi$



## Flusso in una sezione rettangolare

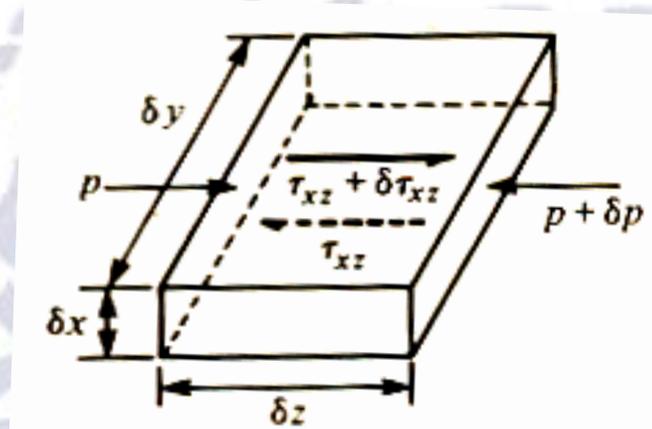


flusso di trascinamento + pressione

$$Q = \frac{W}{2} \left[ v_1 H + \frac{H^3}{6\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]$$

ipotesi di Fluido newtoniano

- flusso isoterma, stazionario, laminare, indipendente dal tempo
- fluido incompressibile
- velocità a parete nulla
- Effetti di bordo trascurabili (scarico)



flusso di pressione

$$Q = \frac{W H^3}{12\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

## a) Flusso di trascinamento

Portata dovuta al trascinamento:  $Q_d = \frac{1}{2} W \cdot H \cdot v_1$

$N$  = velocità della vite (giri/min)

$\rightarrow crf = \pi D$        $\rightarrow$  passo  $p = \pi D \operatorname{tg} \phi$

allora       $v_1 = \pi D N \cos \phi$

$W = T e$     $T = (p - e) \cos \phi = (\pi D \operatorname{tg} \phi - e) \cos \phi \approx \pi D \operatorname{sen} \phi$

Parametri canale	Parametri vite
$H(x)$	$H$
$W(y)$	$T = (p - e) \cos \phi$
$L(z)$	$L / \operatorname{sen} \phi$

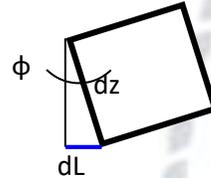
$$Q_d = \frac{1}{2} \cdot \pi D \operatorname{sen} \phi \cdot H \cdot \pi D N \cos \phi$$

$$Q_d = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \operatorname{sen} \phi \cos \phi$$

## b) Flusso di pressione

Portata dovuta alla pressione :  $Q_P = \frac{1}{12\eta} \left( -\frac{dP}{dz} \right) WH^3 = -\frac{1}{12\eta} \frac{dP}{dz} TH^3$

ma  $dz \cdot \sin \phi = dL$



$$\frac{dP}{dz} = \frac{dP}{dL} \sin \phi$$

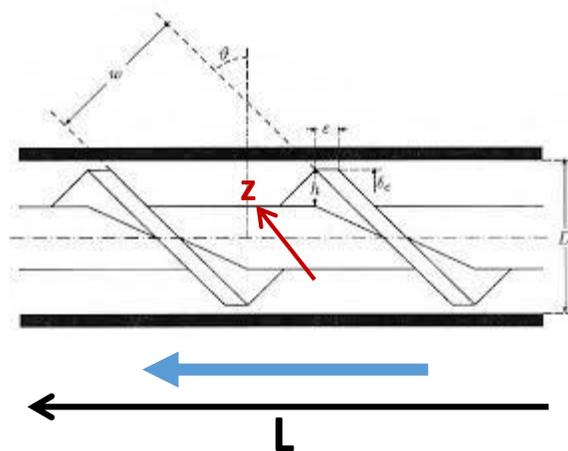
e

$$T \approx \pi D \sin \phi$$

$$Q_P = -\frac{1}{12\eta} \frac{dP}{dL} \pi D H^3 \sin^2 \phi$$

Filiera  $\Rightarrow$

$P >$

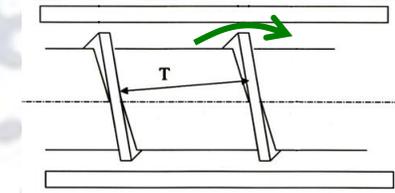


$P <$

### c) Flusso di perdita

Causato da P attraverso il canale di sezione rettangolare con  
 altezza:  $H = d$     lunghezza:  $L = e \cos \phi$

larghezza:  $W = \frac{\pi D}{\cos \phi}$



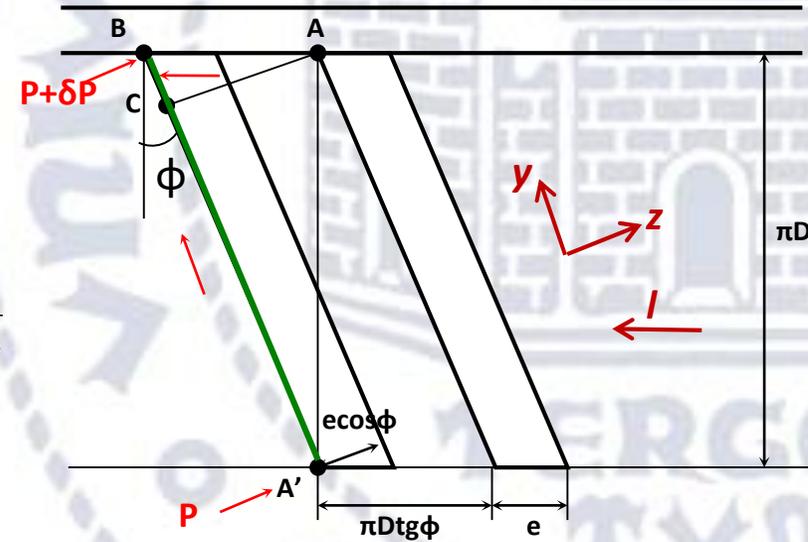
$$Q_L = \frac{1}{12\eta} \left( -\frac{dP}{dz} \right) W H^3$$

La variazione di P lungo lo sviluppo (z)  
 corrisponde alla variazione di P lungo L  
 ovvero lungo  $e \cdot \cos \phi \Rightarrow \frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P}{e \cos \phi}$

$\Delta P_{inC}:A'C = \Delta P_{inB}:A'B$  (segmento verde)

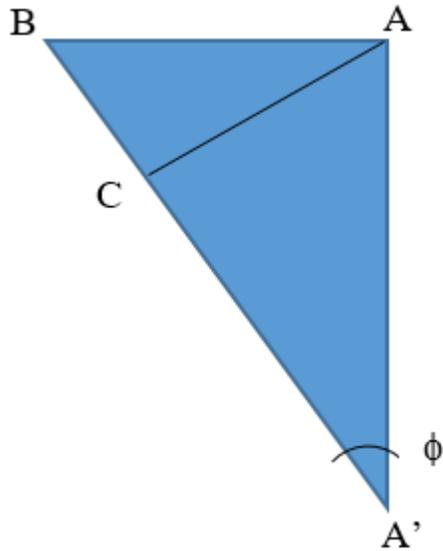
$\Delta P_{inB} = \Delta P_{AB}$

$$\Delta P = \Delta P_{AB} \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \Delta P_{AB} \frac{AB - BC}{AB} = \Delta P_{AB} \frac{\frac{\pi D}{\cos \phi} - \pi D \operatorname{tg} \phi \operatorname{sen} \phi}{\frac{\pi D}{\cos \phi}}$$



### c) Flusso di perdita

Un po' di trigonometria



Triangolo AA'B:

$$AA' = \pi D$$

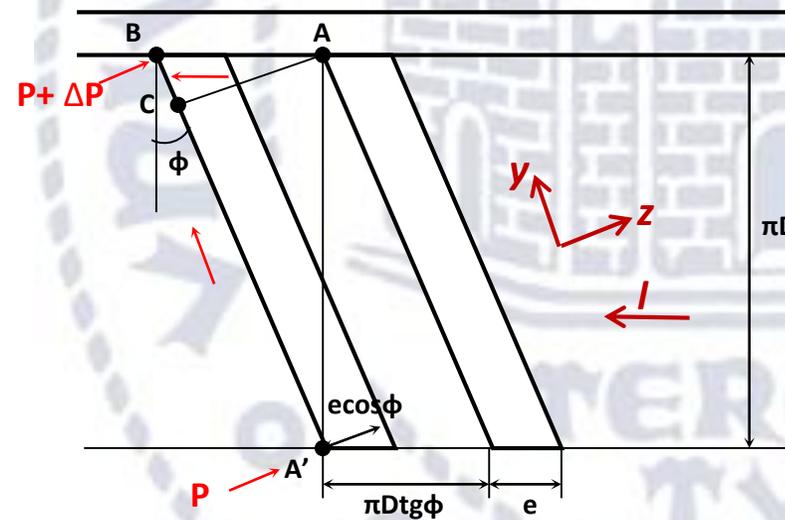
$$A'B = \pi D / \cos \phi$$

Triangolo ABC

$$BC = AB \sin \phi$$

$$\text{ma } AB = A'B \sin \phi = (\pi D / \cos \phi) \sin \phi = \pi D \operatorname{tg} \phi$$

$$\text{quindi } BC = \pi D \operatorname{tg} \phi \sin \phi$$



$$\Delta P = \Delta P_{AB} \frac{AC}{AB} = \Delta P_{AB} \frac{AB - BC}{AB} = \Delta P_{AB} \frac{\frac{\pi D}{\cos \phi} - \pi D \operatorname{tg} \phi \sin \phi}{\frac{\pi D}{\cos \phi}}$$

c) Flusso di perdita

$$\Delta P = \Delta P_{AB} \frac{\overline{AC}}{AB} = \Delta P_{AB} \frac{AB - BC}{AB} = \Delta P_{AB} \frac{\frac{\pi D}{\cos \phi} - \pi D \operatorname{tg} \phi \operatorname{sen} \phi}{\frac{\pi D}{\cos \phi}}$$

$$\Delta P = \Delta P_{AB} \cdot \cos^2 \phi \quad \text{ma} \quad \Delta P_{AB} = \pi D \operatorname{tg} \phi \frac{dP}{dL} \quad \text{quindi} \quad \Delta P = \pi D \operatorname{tg} \phi \cos^2 \phi \frac{dP}{dL}$$

$$Q_L = \frac{1}{12\eta} \left( -\frac{dP}{dz} \right) W H^3 \longrightarrow Q_L = \frac{1}{12\eta} \frac{\pi D \operatorname{tg} \phi \cos^2 \phi}{e \cos \phi} \frac{dP}{dL} \frac{\pi D}{\cos \phi} d^3$$

$$Q_L = \frac{1}{12\eta} \frac{\pi^2 D^2 d^3}{e} \operatorname{tg} \phi \frac{dP}{dL}$$

## Bilancio di massa sul sistema CILINDRO + VITE

$$Q_{CV} = Q_d - (|Q_p| + |Q_L|)$$

Se  $Q_L$  si può considerare trascurabile

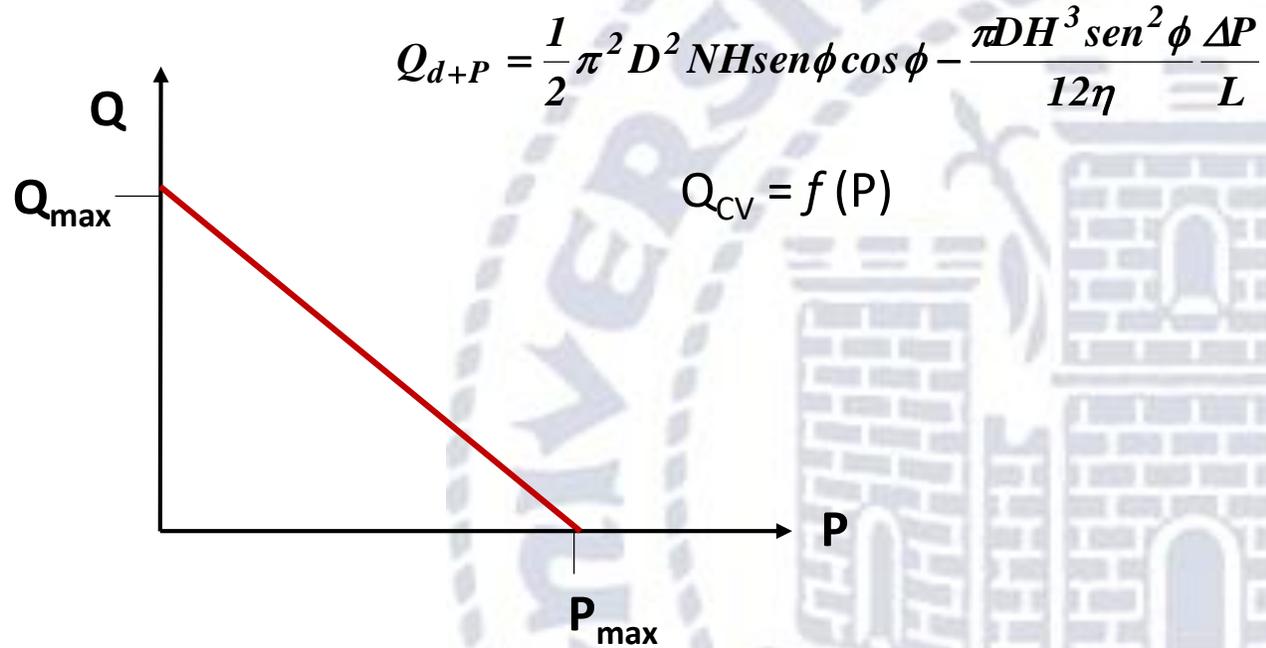
$$Q_{d+P} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi \Delta P}{12 \eta L}$$

$Q = f$  (geometria [ $D, H, \phi, L$ ],

conduzione [ $N, T(\rightarrow \eta)$ ],

proprietà fluido [ $\eta$ ])

Bilancio di massa sul sistema CILINDRO + VITE



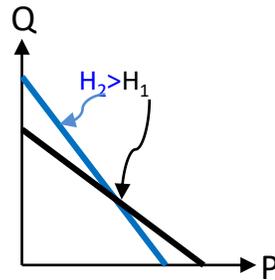
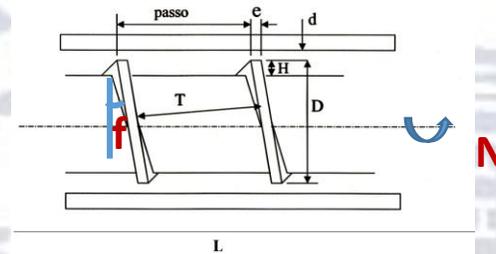
*Casi limite:*

$\Delta P = 0 \quad \rightarrow \quad Q_{max} = Q_d \quad \text{non c'è filiera!}$

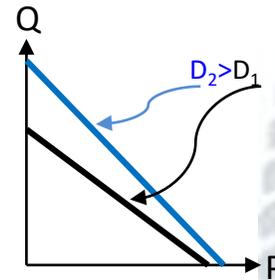
$Q_{min} = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta P_{max} = \frac{6 D L N \eta}{H^2 \operatorname{tg} \phi} \quad \text{la filiera è tappata!}$

$$Q = f(\text{geometria } [D, H, \phi, L], \text{ conduzione } [N, T(\rightarrow \eta)], \text{ proprietà fluido } [\eta])$$

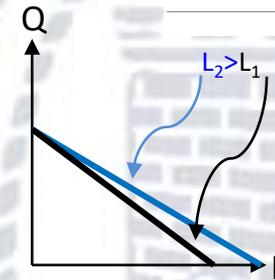
Variazione con la GEOMETRIA (cost N e T ( $\rightarrow \eta$ ))



altezza filetto



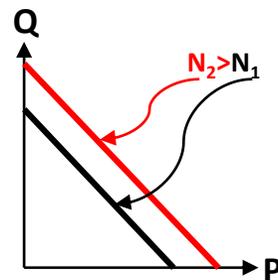
diametro esterno



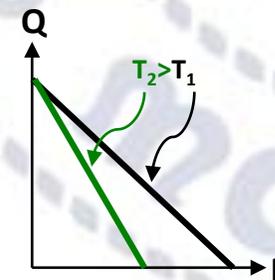
lunghezza vite

Variazione con la CONDUZIONE (geometria costante)

a) T costante



b) N costante

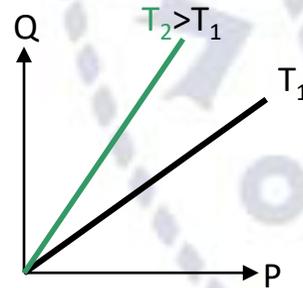
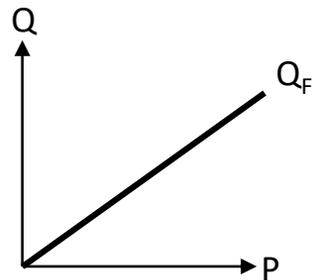


# Bilancio di massa relativamente alla FILIERA

$$Q_F = K_F \cdot (\Delta P / \eta)$$

Con  $K_F$  dipendente dalla geometria della filiera

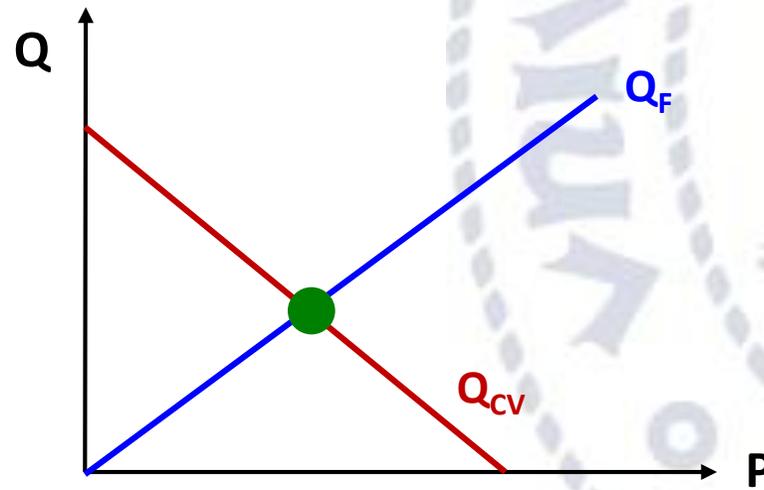
Per filiera circolare di raggio  $R$ :  $K_F = \frac{\pi R^4}{8 L_F}$



Per l'equilibrio deve essere:

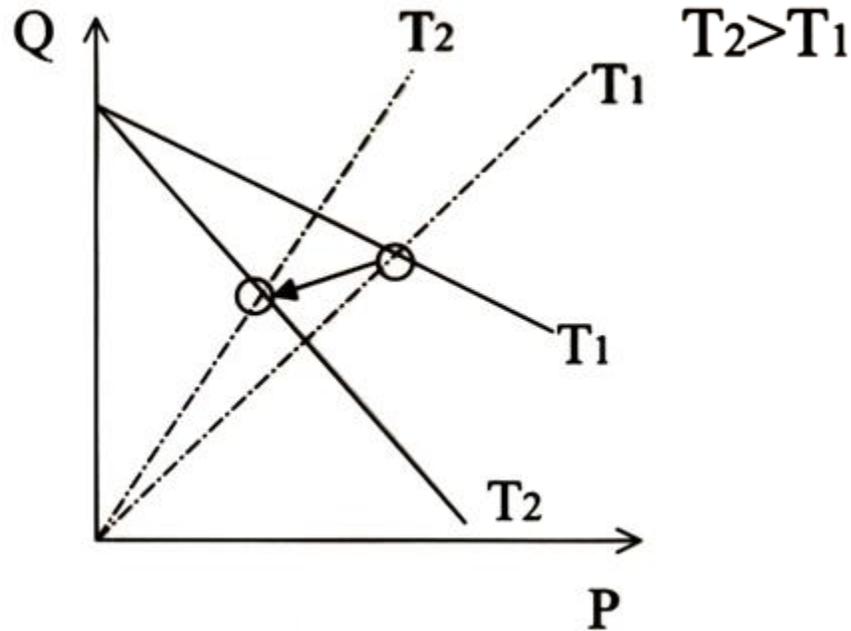
$$Q_{CV} = Q_F$$

⇒ punto di lavoro dell'estrusore

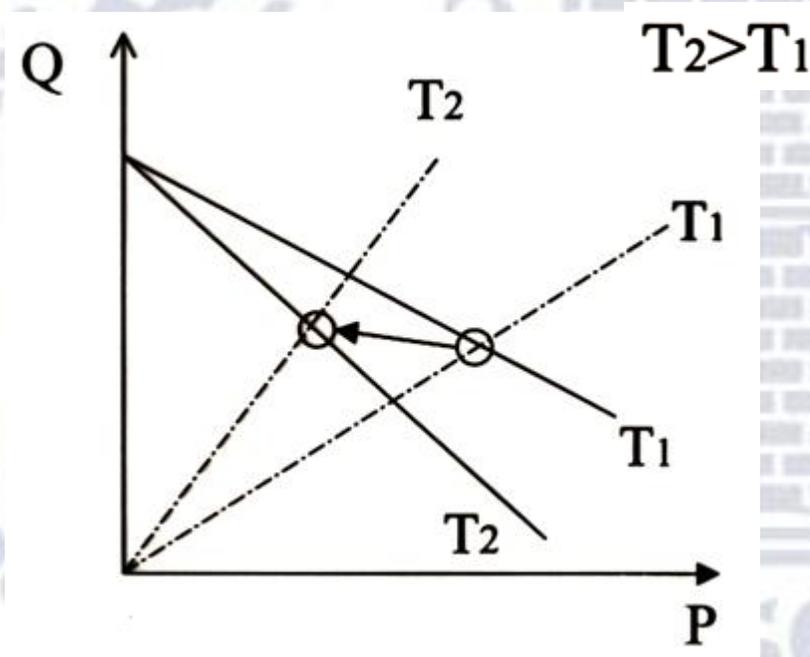


# Influenza della temperatura

*Sistema 1*

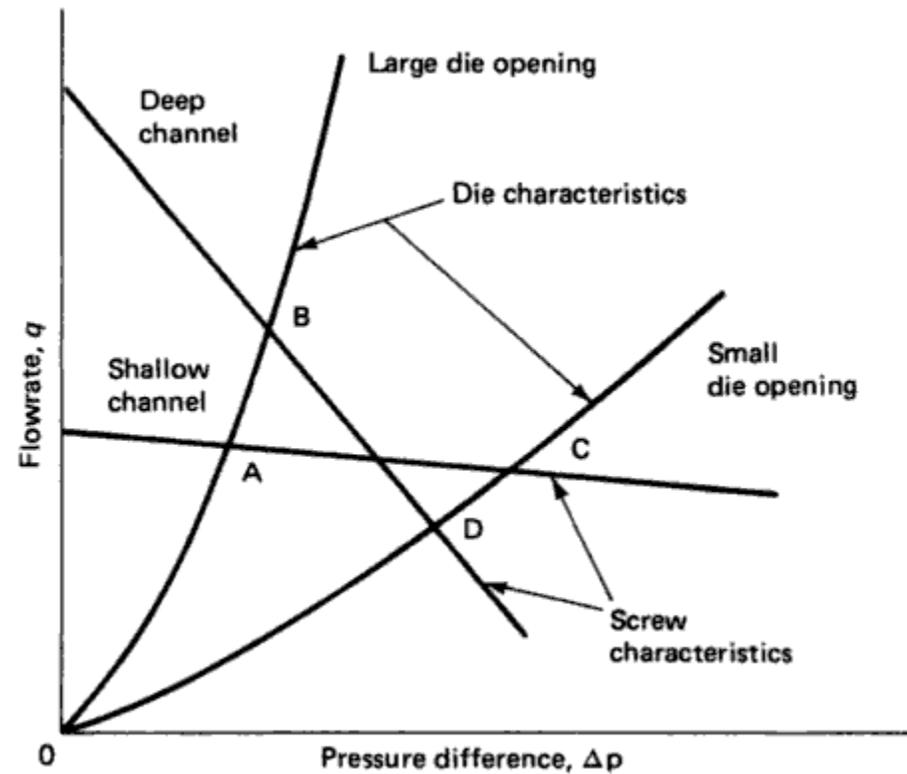


*Sistema 2*



Un aumento di  $T$  causa una riduzione di pressione ( $\delta P$ ) che può essere notevole, MA cui corrisponde solo una lieve variazione di portata, e non sempre in aumento.

## Diagramma di lavoro di un estrusore: caso reale



Screw and die performance characteristic curves for a single-screw extruder.

la viscosità non dipende solo da  $T$  ma anche dalla velocità di deformazione!

# Ritiro, distorsione e altri difetti

Durante il *raffreddamento* si ha una diminuzione del *volume specifico* al diminuire della temperatura

**Amorfo:** la *solidificazione* avviene alla  $T_g$  (vetrificazione)

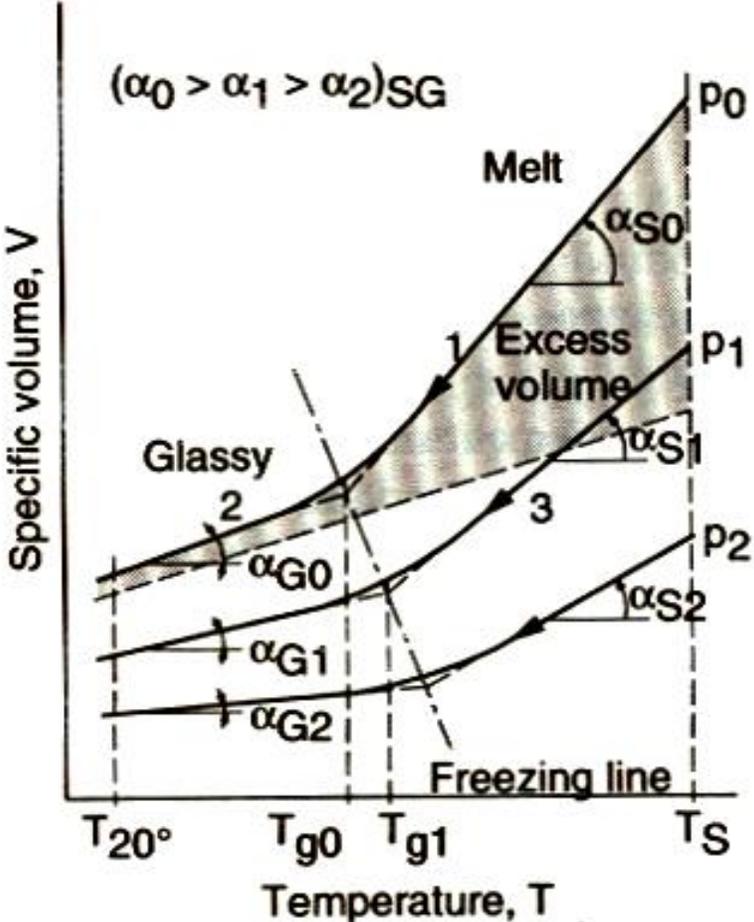
**Semicristallino:** alla  $T$  di inizio cristallizzazione il materiale inizia a solidificare e a  $T_g$  vetrifica

Il volume specifico varia anche con la pressione applicata (es. stampaggio) e, al crescere di  $P$ , la  $T_g$  si sposta a valori più alti

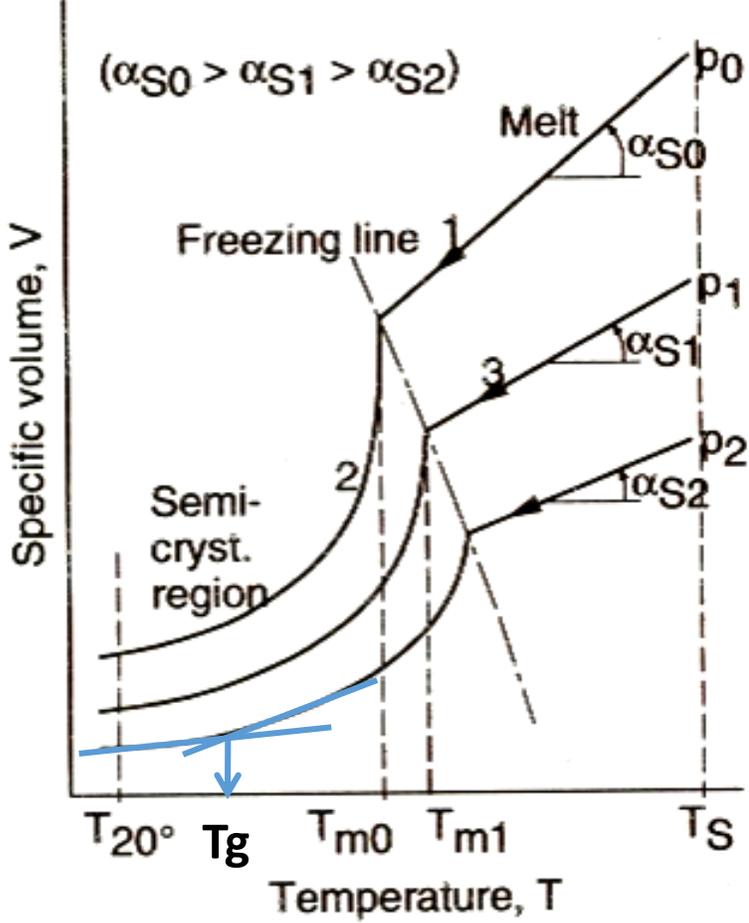
Si usano quindi i diagrammi P-V-T →

# Diagramma P-V-T

amorfo



semicristallino



## La velocità di raffreddamento è un parametro importante!

Nello stato di fuso si ha dello spazio vuoto in cui le molecole possono muoversi liberamente.

### Volume libero

Il libero movimento per una molecola o per segmenti di catena termina alla  $T_g$  o punto di solidificazione: *il volume libero risulta congelato*.

L'entità del *volume libero congelato* dipende dalla velocità di raffreddamento:

Alte velocità di raffreddamento portano a maggior volume libero

Maggior volume libero significa materiale meno fragile

MA

con maggiore permeabilità a gas o liquidi

⇒ *Trattamento di ricottura*: si consente la fine della cristallizzazione

## Le pareti si raffreddano prima del cuore!!!!

Ciò comporta l'insorgere di due fenomeni:

- ❖ ritiro
- ❖ tensioni residue

### Ritiro:

Tutti i materiali sono soggetti a dilatazione/ritiro termico

MA un polimero dalla  $T_{\text{fuso}}$  a  $T_{\text{ambiente}}$  si ritira maggiormente!!!

(confronto tra i coefficienti di dilatazione termica  $\alpha$ )

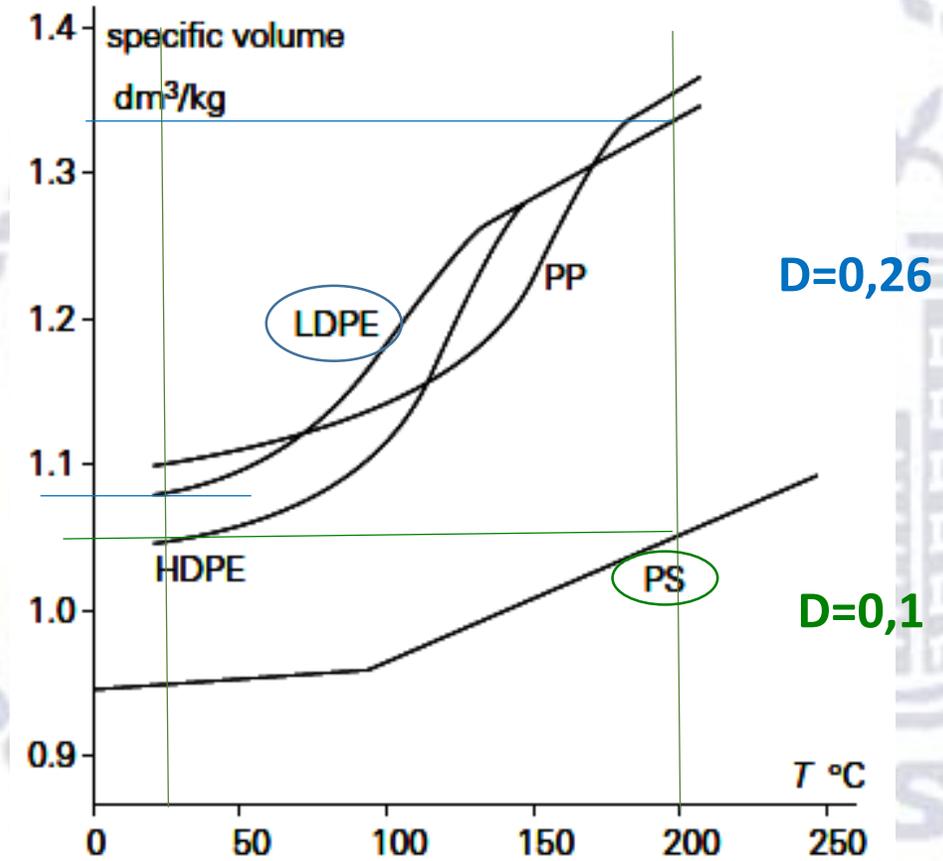
$\alpha \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3: 8; \text{Acciaio}: 12; \text{Al}: 24; \text{PP}: 120; \text{LDPE}: 200$

Gli amorfi hanno un ritiro tipico del 6÷10% volumetrico

I semicristallini almeno il doppio ( $\rightarrow$  sino al 25% !)

PS amorfo

LDPE, PP e HDPE semicristallini



Se un pezzo formato dal fuso fosse lasciato libero di ritirarsi in tutte le direzioni durante il processo di raffreddamento, la *dimensione lineare* del prodotto finale sarebbe almeno il 2% minore di quella del fuso

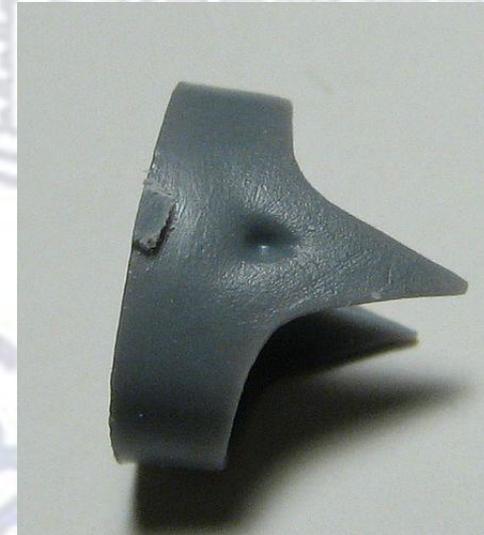
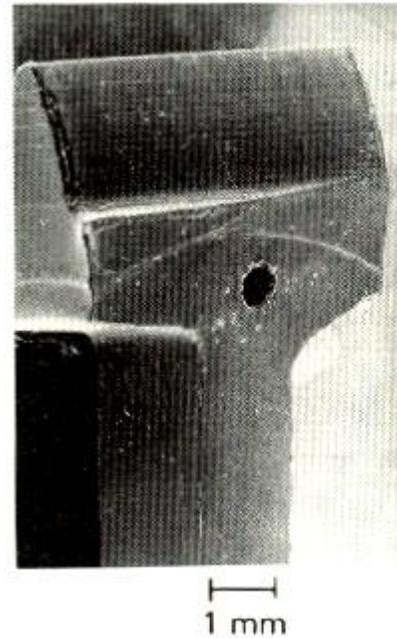
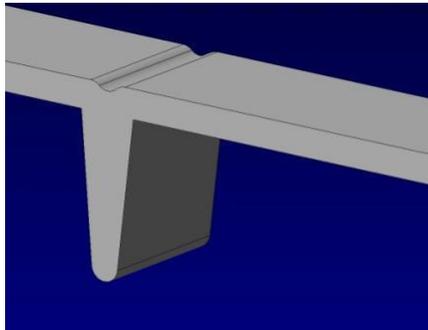
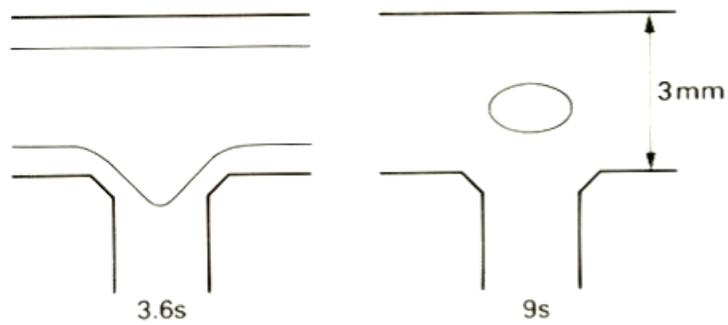
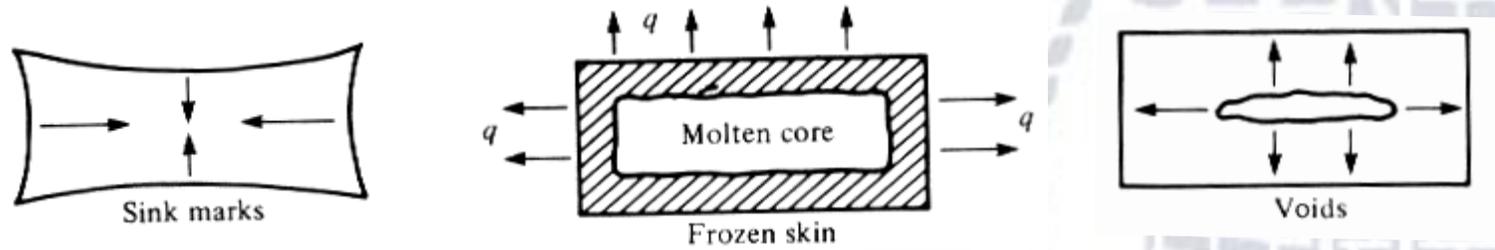
(6% volumetrico/3 = 2% lineare)

Stampaggio: il ritiro deve essere valutato in fase di formatura:

- aumentando la quantità di materia messa in stampo (si riduce il volume libero e quindi il ritiro)
- aumentando la pressione applicata (si riduce il volume libero e quindi il ritiro)
- aumentando il tempo di applicazione della pressione (si dà tempo al polimero di riarrangiarsi e ridurre quindi il volume libero)
- allargando il canale d'iniezione (si dà tempo al polimero di riarrangiarsi e ridurre quindi il volume libero)

I difetti che si possono verificare sono quelli di

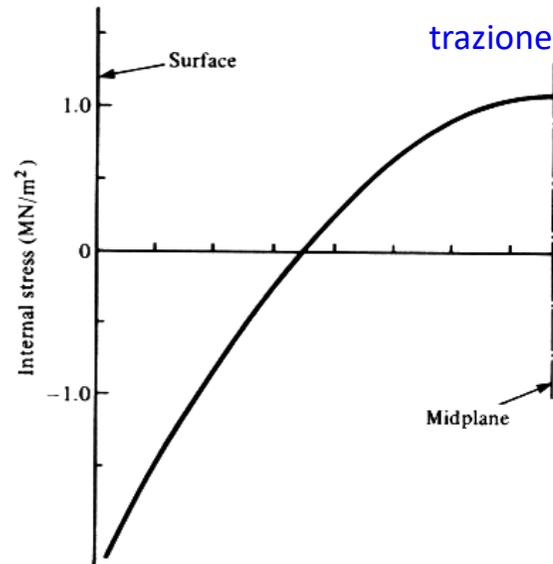
- Presenza di depressioni superficiali (tipico per costolature)
- Presenza di vuoti interni



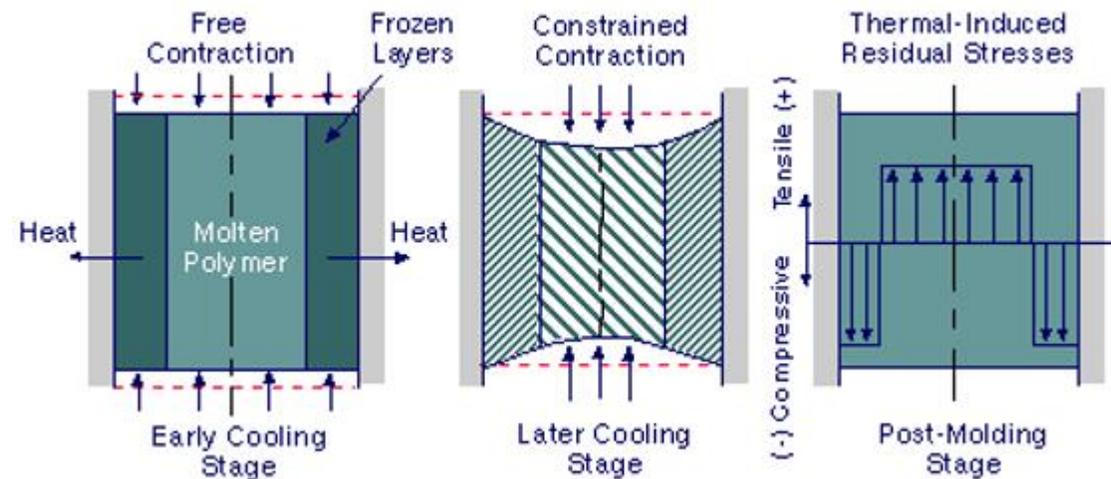
**Tensioni residue:** A causa dei tempi diversi di raffreddamento tra superficie e cuore, sia per prodotti estrusi che per quelli formati ad iniezione, o in stampo, si instaurano *tensioni residue*

Es.: raffreddamento di una lastra piana

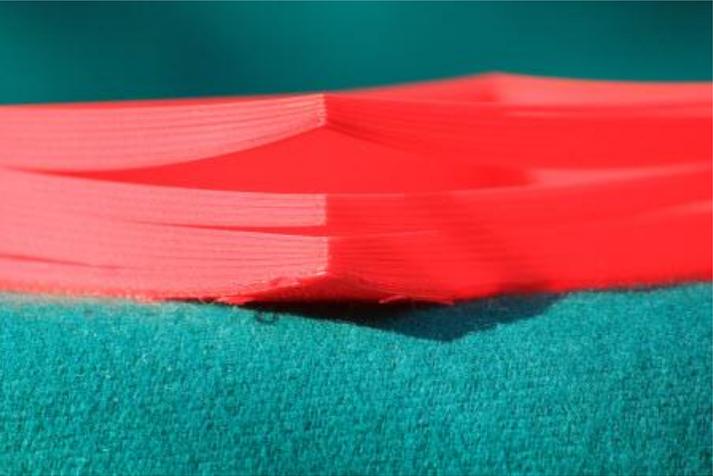
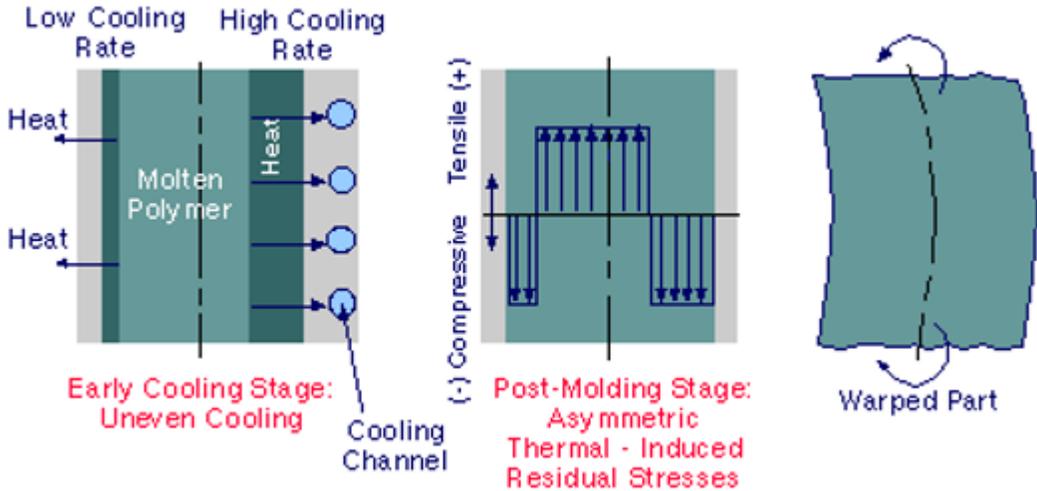
Sulla superficie che solidifica prima si sviluppano sforzi di **compressione**, mentre al centro ci saranno sforzi di **trazione**:



**Compressione**  
Stress residui in una  
barra di PS

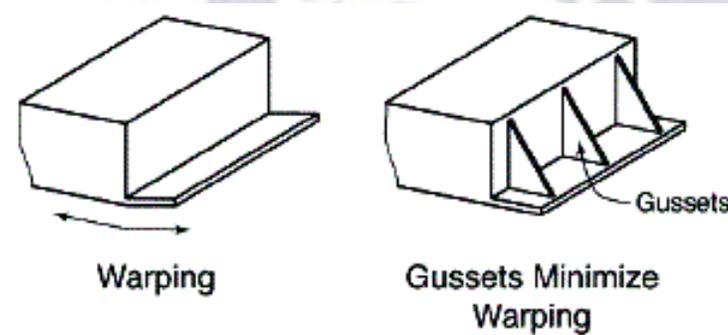


Se il raffreddamento non è simmetrico, si inducono distorsioni



# Cosa fare per ovviare?

Pezzi con spessori diversi



Per ridurre le tensioni residue:

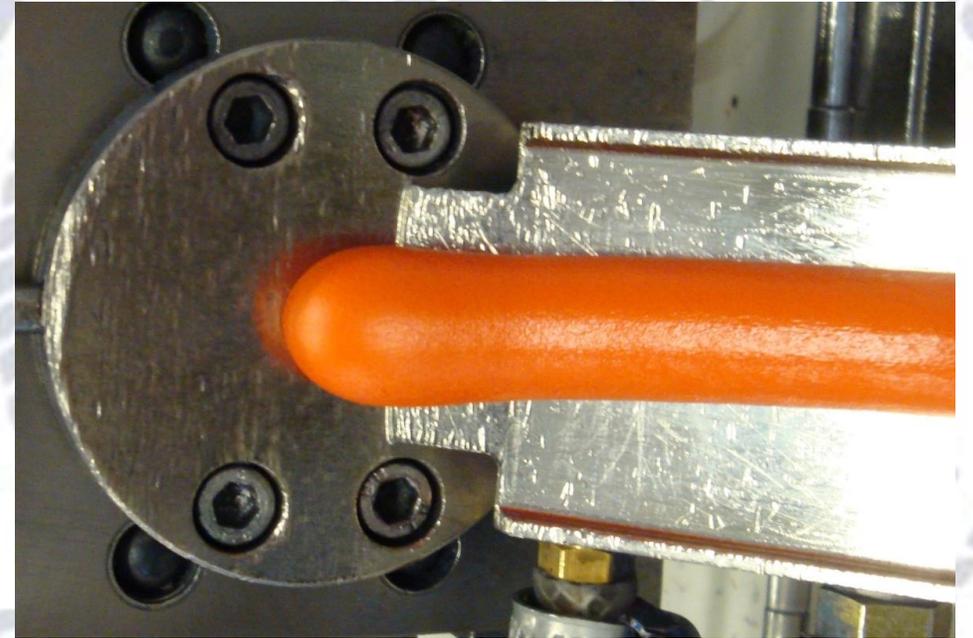
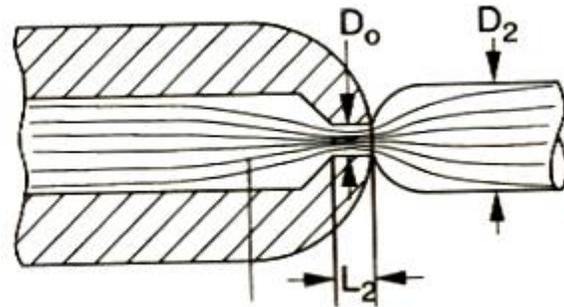
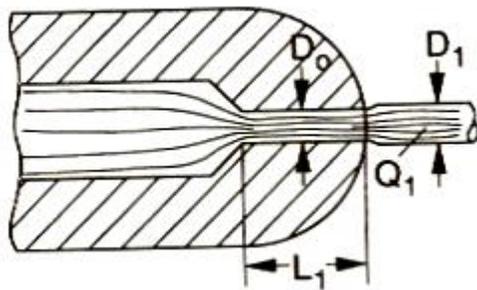
- utilizzo di bagni di raffreddamento a  $>T_b$
- riducendo il modulo di Biot ( $=hx/k \Rightarrow \textit{medium}$ )

In opera, la presenza di tensioni residue può portare a  
*stress cracking*

# Difetti in Estrusione

- rigonfiamento dovuto a recupero elastico:

si può ovviare aumentando la lunghezza del canale di uscita



# Difetti in Estrusione

- **velocità di estrusione**: se troppo elevata il polimero non riesce a rilassare  $\Rightarrow$

presenza di **difetti** di varia morfologia:

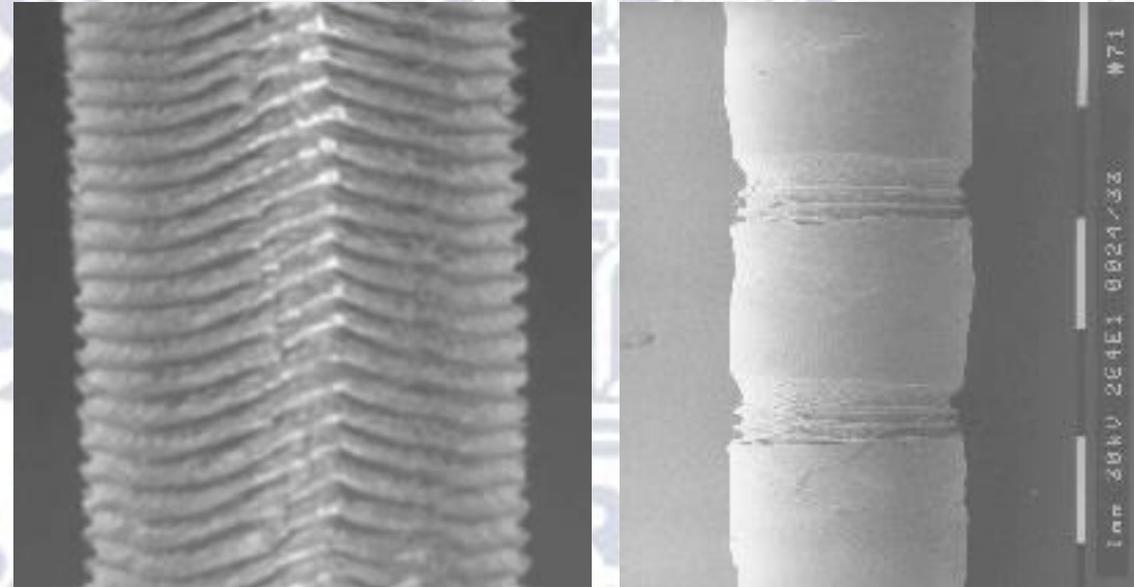
- ondulazioni (pelle di squalo – shark skin)

Dipende dalla *temperatura* del fuso e dalla *velocità di estrusione*. Polimeri con alta viscosità e stretta distribuzione di M sono i più sensibili.

- ondulazioni intermittenti (effetto stick-slip)

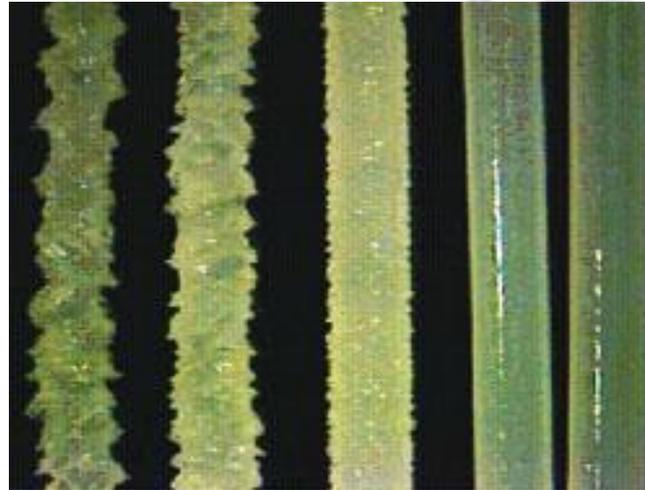
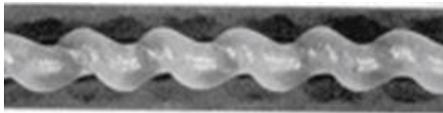
per  $\tau_{\text{polimero}/\text{parete}}$  vicino al valore critico di 0,1MPa –

polimeri lineari

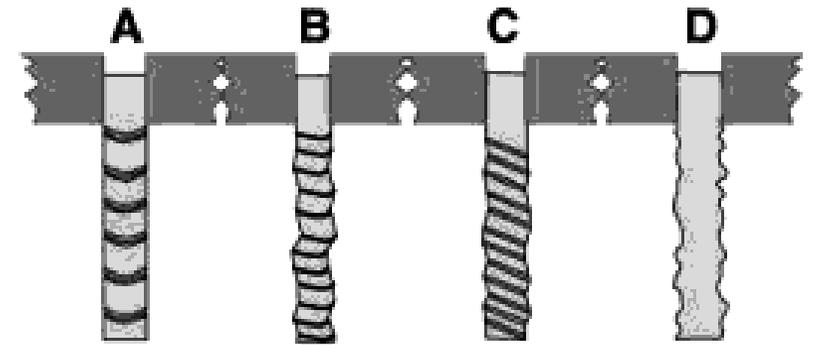


# Difetti in Estrusione

- geometria a elica (PP)



- A. Spiraling
- B. Bambooing
- C. Regular ripple
- D. Random fracture

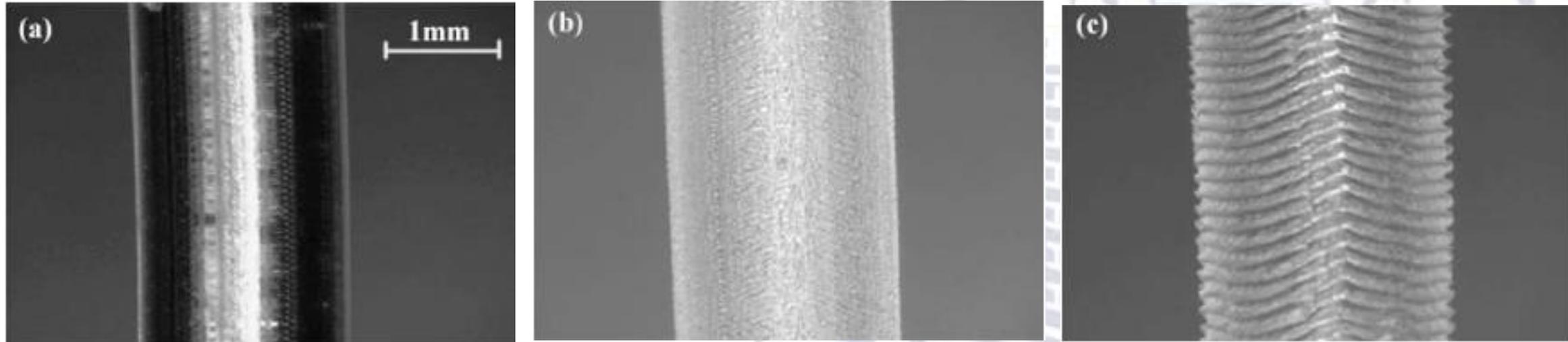


- rottura del fuso

è associata a fluttuazioni di pressione nella filiera. Non è un fenomeno superficiale, ma coinvolge tutta la massa dell'estruso. La superficie può rimanere liscia, ma l'estruso è distorto

# Difetti in Estrusione

LLDPE (Dow Affinity EG8100) estruso a  $T_{\text{bulk}} = 140^{\circ}\text{C}$



Transizione da estruso stabile a pelle di squalo.

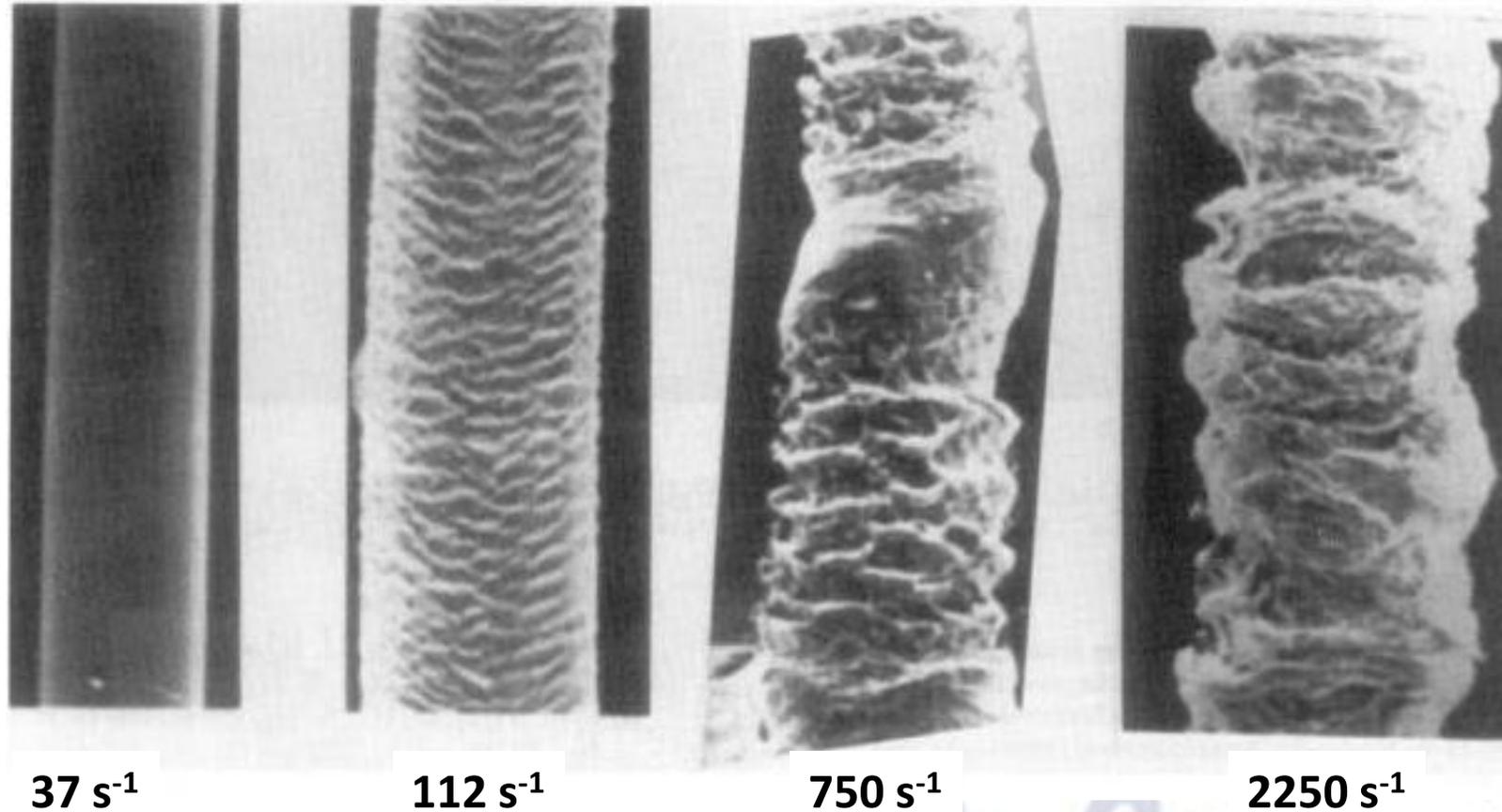
a) superficie liscia ( $\dot{\gamma} = 8 \text{ s}^{-1}$ );

b) perdita di lucidità e inizio della pelle di squalo ( $\dot{\gamma} = 16 \text{ s}^{-1}$ );

c) pelle di squalo ( $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$ )

# Difetti in Estrusione

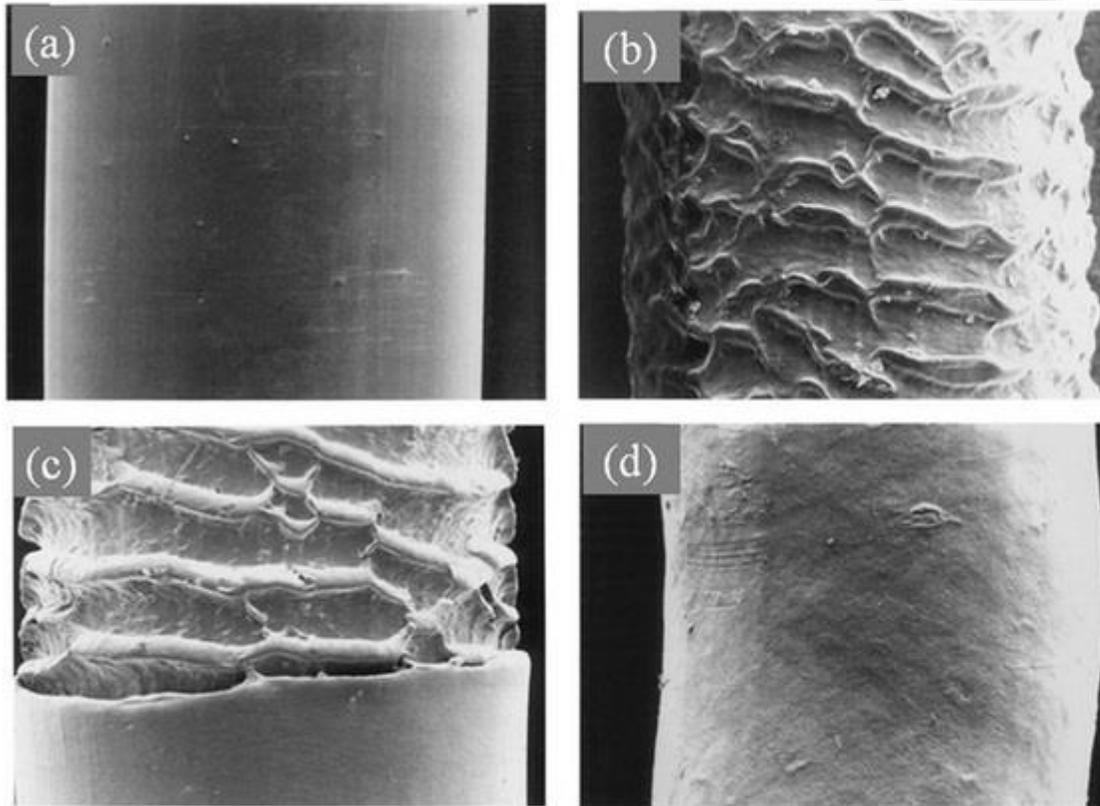
LLDPE  
estruso da  
capillare



diverse velocità di taglio apparente

# Difetti in Estrusione

LDPE

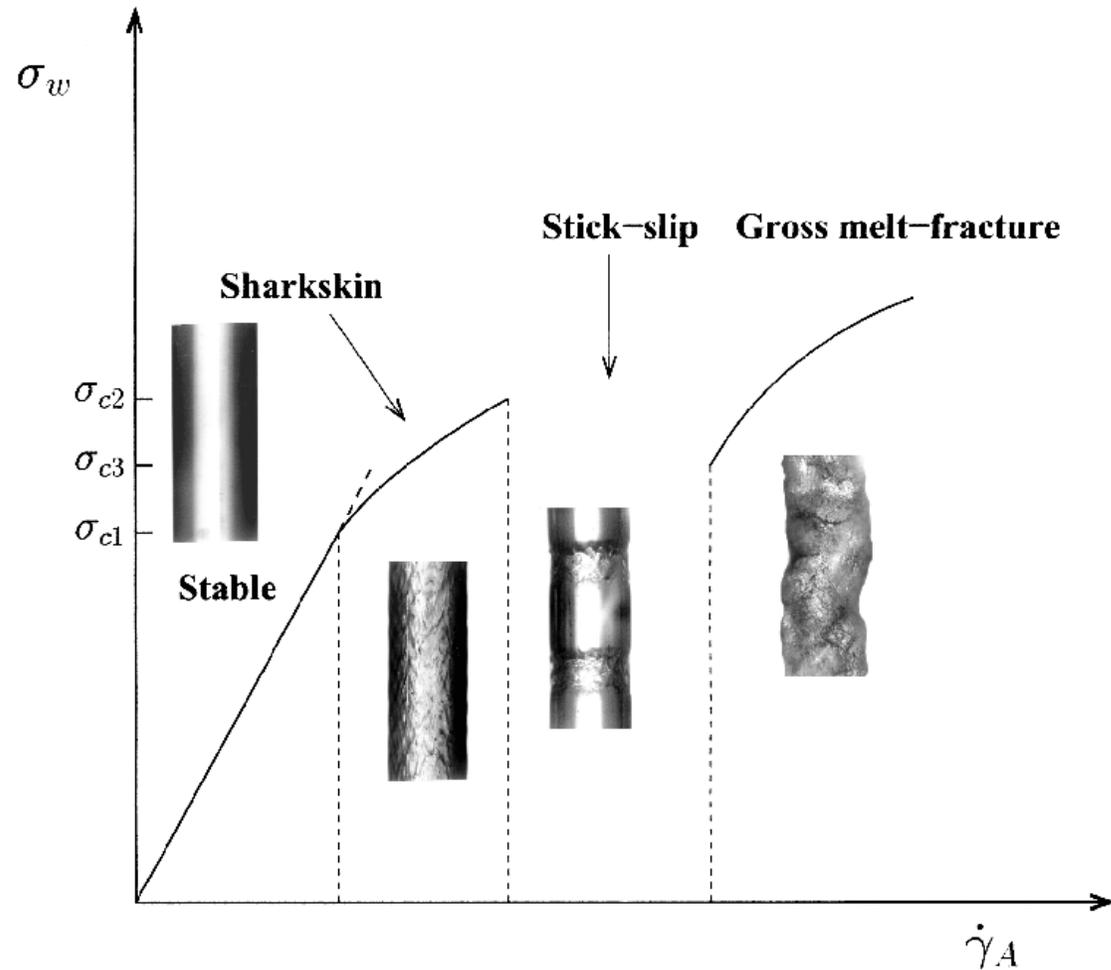


Example of extrudate distortions in LDPE. From left to right: stable flow, sharkskin, slip-stick, wavy zones. Reproduced with permission from [219], Copyright 2001, Annual Reviews.

This figure was uploaded by [P. Cassagnau](#).

# Difetti in Estrusione

Typical flow curve for a linear polyethylene and regions of instability



Materials Science Published 2002  
DOI:10.1515/arh-2002-0006  
**On numerical Simulations of Polymer Extrusion Instabilities**  
Evdokia C. Achilleos, Georgios C. Georgiou, Savvas G. Hatzikiriakos

# Difetti in Estrusione

Le cause di tutti questi difetti sono dovuti a:

- Velocità di estrusione troppo alta
- Elevata viscosità del fuso
- Temperatura bassa

Correttivi possono essere:

- Aumentare la temperatura della filiera
- Ridurre la velocità di estrusione
- Usare un lubrificante esterno

