

Materiali Polimerici e Compositi

5.1 – Fusi polimerici

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)

→ **REOLOGIA:** scienza che studia il comportamento di un fluido durante la deformazione indotta dal flusso

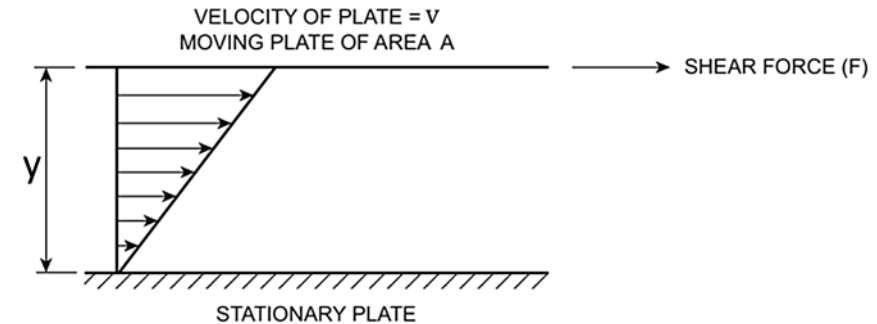
Principali processi di formatura

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

Flusso nei fusi termoplastici - Definizioni

- Sforzo di Taglio τ (*shear stress*): sforzo esercitato da una lastra che si muove con una velocità uniforme v in direzione parallela al piano della lastra stessa.

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



Si ipotizza che il liquido bagni le piastre e che lo strato molecolare di liquido adiacente alla piastra superiore si muova alla stessa velocità della piastra, mentre lo strato adiacente alla piastra stazionaria è fermo ($v = 0$). Gli strati intermedi del liquido si muovono a velocità intermedie, come indicato dalle frecce nel diagramma.

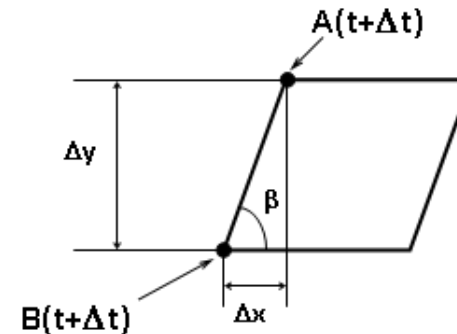
Flusso nei fusi termoplastici - Definizioni

- La velocità di taglio (shear rate) è definita come il tasso di variazione della velocità in direzione ortogonale alla piastra.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$$

- Deformazione di taglio γ (shear strain): spostamento nella direzione del flusso per unità di distanza in un certo periodo di tempo t

$$\gamma_{AB} = \frac{x_A - x_B}{AB} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{1}{\tan \beta}$$



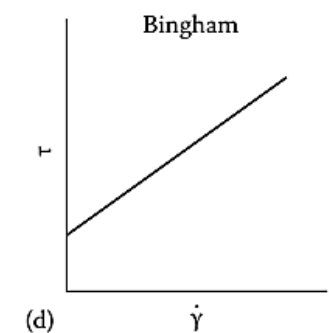
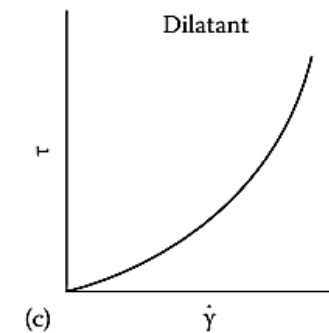
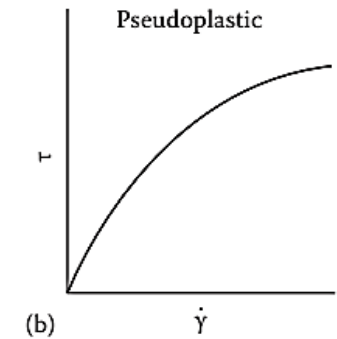
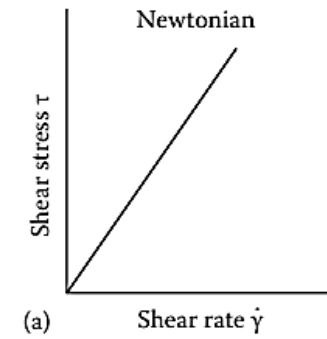
- Viscosità η (shear viscosity): grandezza che rappresenta l'attrito interno di un liquido, definita come la resistenza al flusso di taglio opposta da un fluido in direzione $\perp$ al flusso.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad \longrightarrow \quad \tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Flusso nei fusi termoplastici - Definizioni

- Fluido Newtoniano: La viscosità η è INDIPENDENTE da $\dot{\gamma}$
- Fluido NON newtoniano: La viscosità η DIPENDE da $\dot{\gamma}$

Tipo di fluido	Comportamento
Fluido Newtoniano	la viscosità non dipende dallo shear rate
Fluido Dilatante	la viscosità aumenta con lo shear rate (<i>shear thickening</i>)
Fluido Pseudoplastico	la viscosità diminuisce con lo shear rate (<i>shear thinning</i>)
Comportamento Bingham	Non c'è flusso finché non viene raggiunto lo yield stress (e.g plastiche molto caricate)
Tissotropia	la viscosità diminuisce nel tempo con shear rate costante
Reopessia	la viscosità aumenta nel tempo con shear rate costante



Flusso nei fusi termoplastici - Definizioni

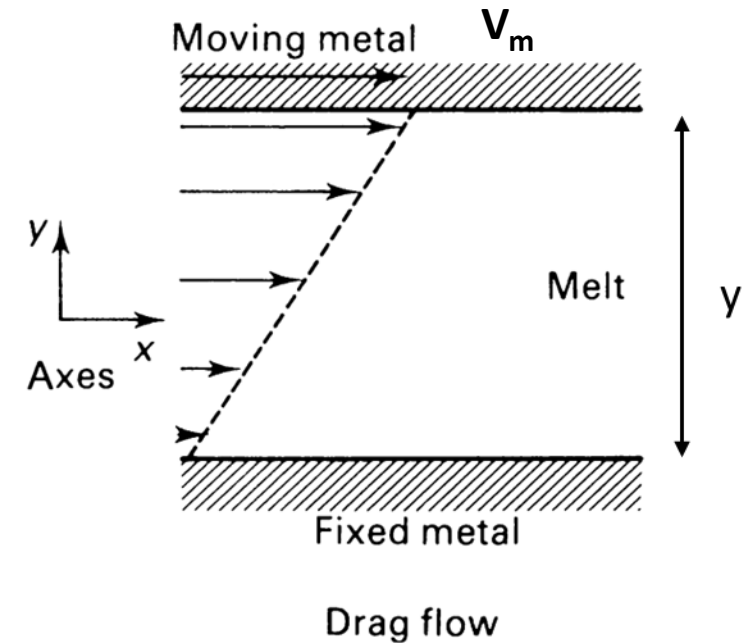
Flusso di trascinamento (*drag flow*):

Quando un elemento metallico si muove ad una velocità v rispetto all'altro elemento fisso e il fuso polimerico aderisce al metallo, il flusso di trascinamento provoca un flusso di taglio con velocità di taglio.

Alle interfacce, le velocità del polimero e del metallo sono uguali (0 sulla superficie stazionaria e V_m sulla superficie in movimento).

La **velocità di taglio** $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$ diventa $\dot{\gamma} = \frac{V_m}{y}$

Questo risultato è valido indipendentemente dal fatto che il fuso abbia o meno un comportamento newtoniano.



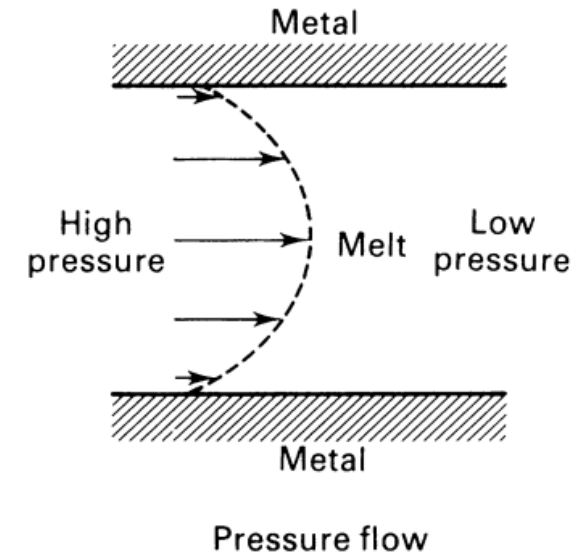
→ Il flusso di trascinamento si verifica nel cilindro di un estrusore, come risultato della rotazione della vite.

Flusso nei fusi termoplastici - Definizioni

Flusso di pressione (*pressure flow*)

Il flusso di pressione è un flusso di taglio tra due elementi metallici fissi dovuto ad un gradiente di pressione nel fuso polimerico.

La pressione p diminuisce lungo le linee di flusso, che sono perpendicolari alle isobare. Per sezioni trasversali rettangolari, circolari o anulari, lo sforzo di taglio τ varia linearmente lungo il canale con velocità massima al centro.



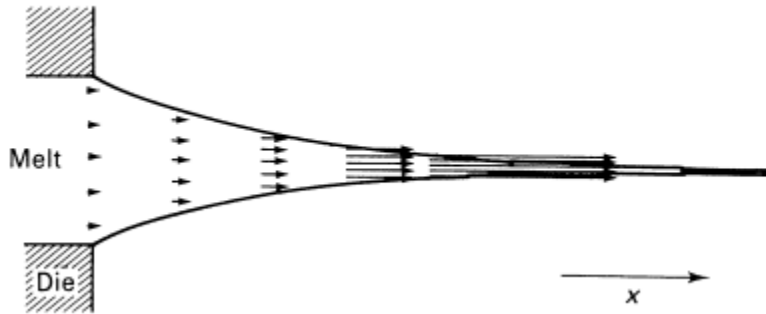
Molti flussi di taglio sono combinazioni di flussi di pressione e di trascinamento.

→ Il flusso di pressione si verifica nel cilindro di un estrusore: la p nella zona di dosaggio è maggiore rispetto alla p nella zona di alimentazione.

Flusso nei fusi termoplastici - Definizioni

Flusso estensionale (*extensional flow*)

Nei flussi estensionali, la velocità aumenta (es. filatura della fibra fusa) o diminuisce (es. flusso radiale dalla materozza in uno stampo a iniezione) lungo le linee di flusso, ma non vi è alcun gradiente di velocità in direzione perpendicolare (**velocità costante nella sezione trasversale**).



Filatura di fibre fuse:

- la velocità V_x aumenta con la distanza x , come risultato di una sollecitazione di trazione σ_x lungo la fibra.
- Lo sforzo di trazione aumenta con x , come risultato della diminuzione della sezione trasversale della fibra.

Fusi polimerici

Caratteristiche generali dei fusi polimerici:

- I fusi polimerici sono tipicamente fluidi non-newtoniani
 - Le proprietà del flusso sono dipendenti da T
- } $\eta = \eta(\dot{\gamma}, T)$
- Riduzione di viscosità da sforzo (fluidi pseudoplastici - *shear thinning*)
 - La maggior parte dei processi è dominata dalla presenza di gradienti di velocità $\dot{\gamma}$ (*shear rate*)
 - Alcuni fusi polimerici presentano un significativo effetto elastico durante la deformazione.

1. Estrusione

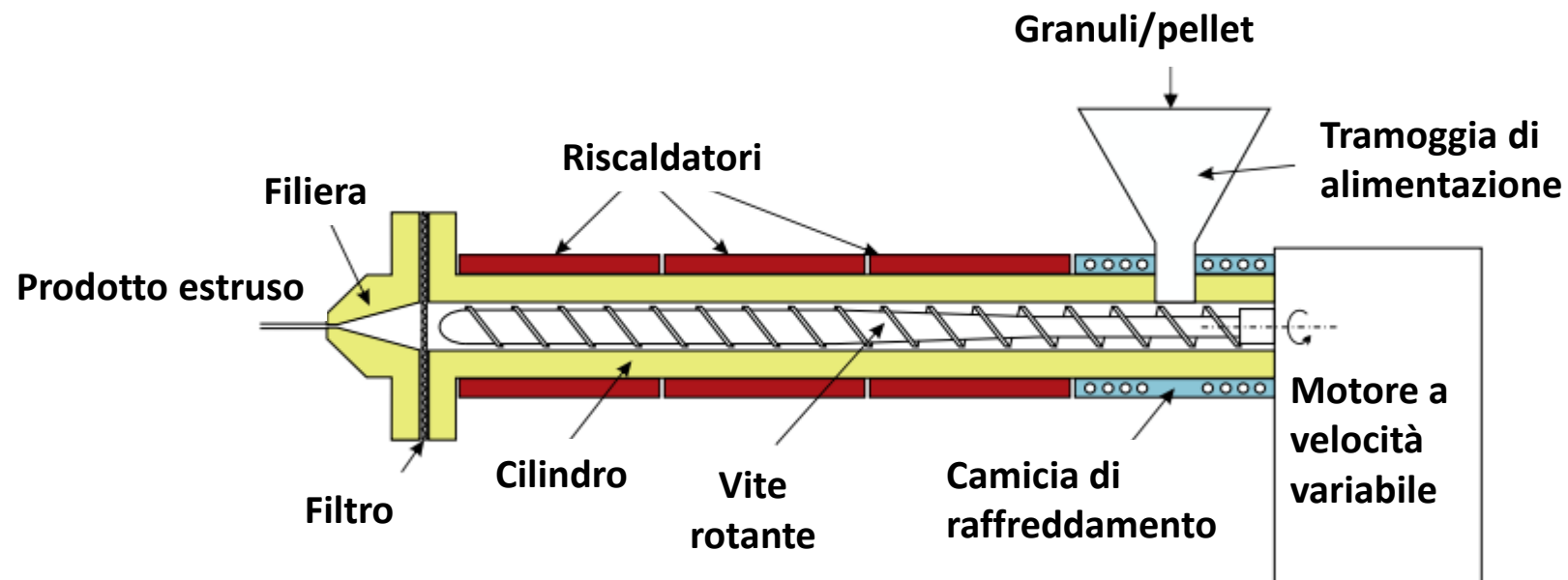
Processo in cui una materia plastica fatta rammollire viene forzata attraverso una filiera per ottenere un prodotto continuo (foglie, lastre, tubi, profilati).

Lastra: spessore > 1 mm

Foglia: spessore tra 0,1 e 1 mm

Film: spessore $< 0,1$ mm (tipicamente anche molto più sottili $\rightarrow 10\text{ }\mu\text{m}$)

Materiali	T estrusione
LDPE	150-200°C
HDPE	170-200°C
PP	190-220°C
PS	150-220°C
PVC	150-180°C
ABS	190-220°C
PMMA	180-240°C



1. Estrusione

- L'estrusione è uno dei più importanti metodi di lavorazione delle materie plastiche.
- Tra i prodotti più importanti vi sono fogli, pellicole, fibre e tubi di plastica.
- **Viene utilizzata anche per il compounding**, dove il polimero puro proveniente dal reattore di polimerizzazione viene miscelato con vari additivi e convertito in pellet di plastica da utilizzare successivamente in altri processi.

Granuli - Pellet

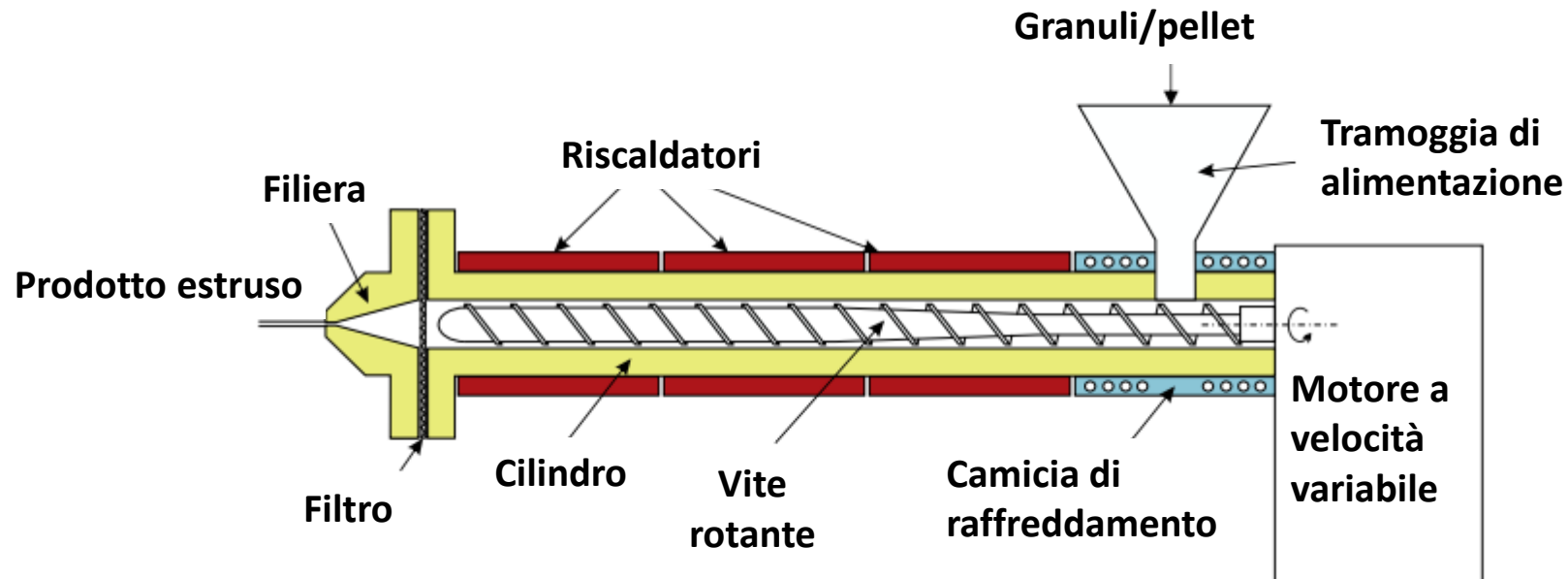


Prodotti estrusi



1. Estrusione

1. La plastica (granuli/pellet) viene alimentata da una tramoggia. **Una camicia di raffreddamento controlla la temperatura locale evitando la fusione prematura del materiale.**
2. Viene quindi trasportata lungo il cilindro, dove viene riscaldata a causa degli sforzi di taglio dovuti al movimento della vite ed eventualmente per conduzione dai nastri riscaldanti intorno al cilindro.
3. All'estremità dell'estrusore la massa fusa passa attraverso una filiera per produrre un estruso della forma desiderata.



1. Estrusione

Alimentazione (Feed):

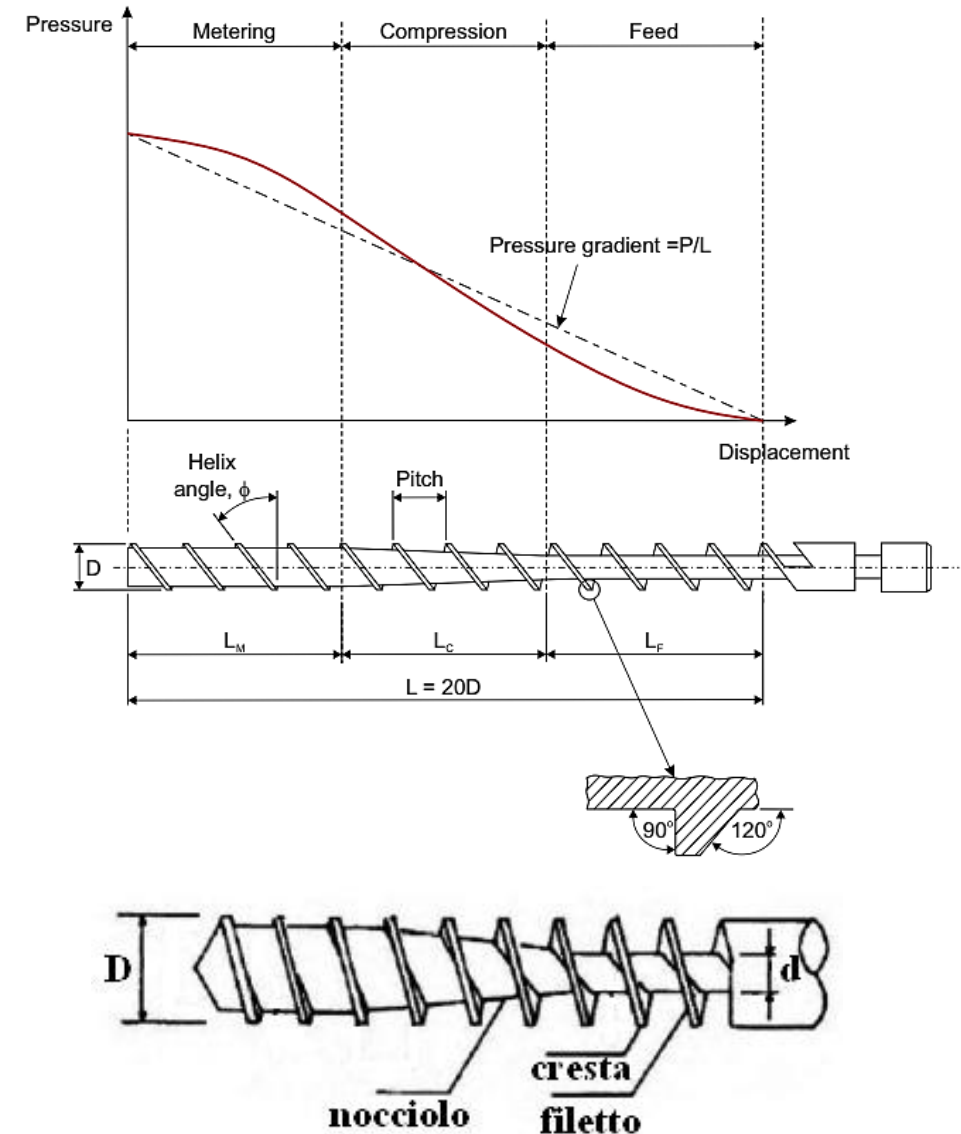
- La funzione di questa zona è quella di preriscaldare la plastica inizialmente solida e di trasportarla alle zone successive.
- Diametro del nocciolo (d) è costante

Compressione (Compression):

- In questa zona avviene il processo di compressione e di graduale fusione della plastica
- Bolle d'aria vengono schiacciate verso feed.
- Combinazione di calore dovuto ad attrito, sforzi di taglio e conduzione dalle pareti del cilindro riscaldate
- Il diametro del nocciolo (d) aumenta

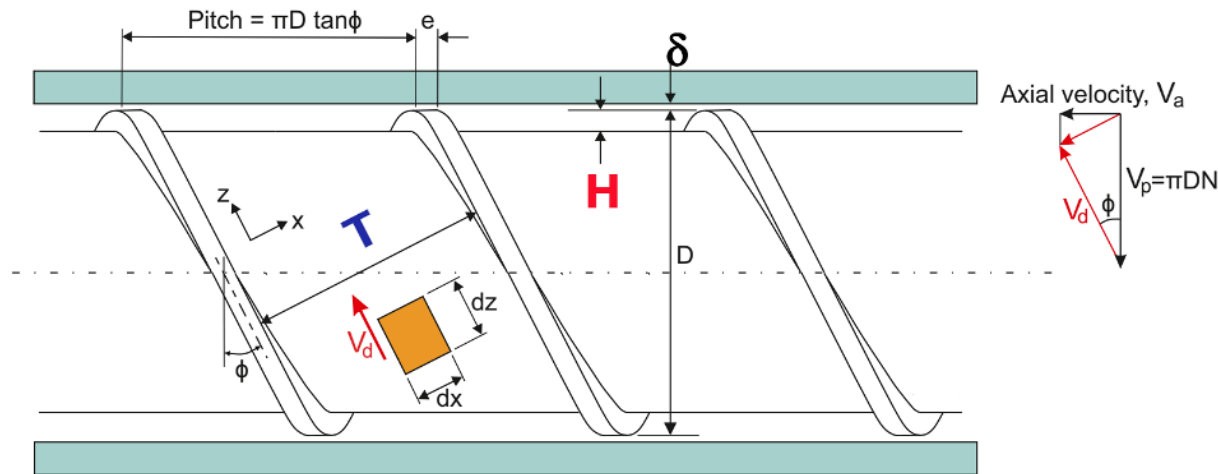
Dosaggio (Metering)

- Convogliare la plastica fusa alla filiera ad una velocità costante, temperatura e pressione uniformi
- Diametro del nocciolo (D) è costante, ma maggiore della zona di alimentazione



1. Estrusione

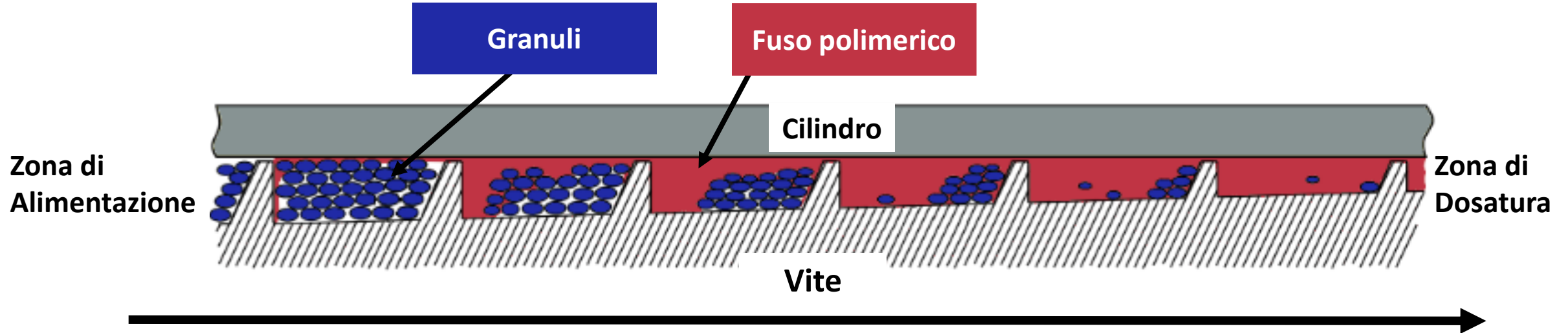
Dimensioni tipiche di un estrusore



L/D	Length to diameter ratio 20 or less for feeding or melt extruders 25 for blow molding, film blowing, and injection molding 30 or higher for vented extruders or high output extruders
D	Standard diameter
US (inches)	0.75, 1.0, 1.5, 2, 2.5, 3.5, 4.5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, and 24
Europe (mm)	20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, and 600
Φ	Helix angle 17.65° for a square pitch screw where $L_s = D$ New trend: $0.8 < L_s/D < 1.2$ $L_s = \text{passo (pitch)}$
h	Channel depth in the metering section (0.05–0.07) D for $D < 30$ mm (0.02–0.05) D for $D > 30$ mm $h = H = \text{altezza del canale}$
β	Compression ratio: $h_{\text{feed}} = \beta h$ 2 to 4 $\beta = h_{\text{feed}} / h_{\text{metering}}$
δ	Clearance between the screw flight and the barrel 0.1 mm for $D < 30$ mm 0.15 mm for $D > 30$ mm
N	Screw speed 1–2 rev/s (60–120 rpm) for large extruders 1–5 rev/s (60–300 rpm) for small extruders

1. Estrusione – zona di compressione

Zona di compressione $\Rightarrow$ fusione della plastica



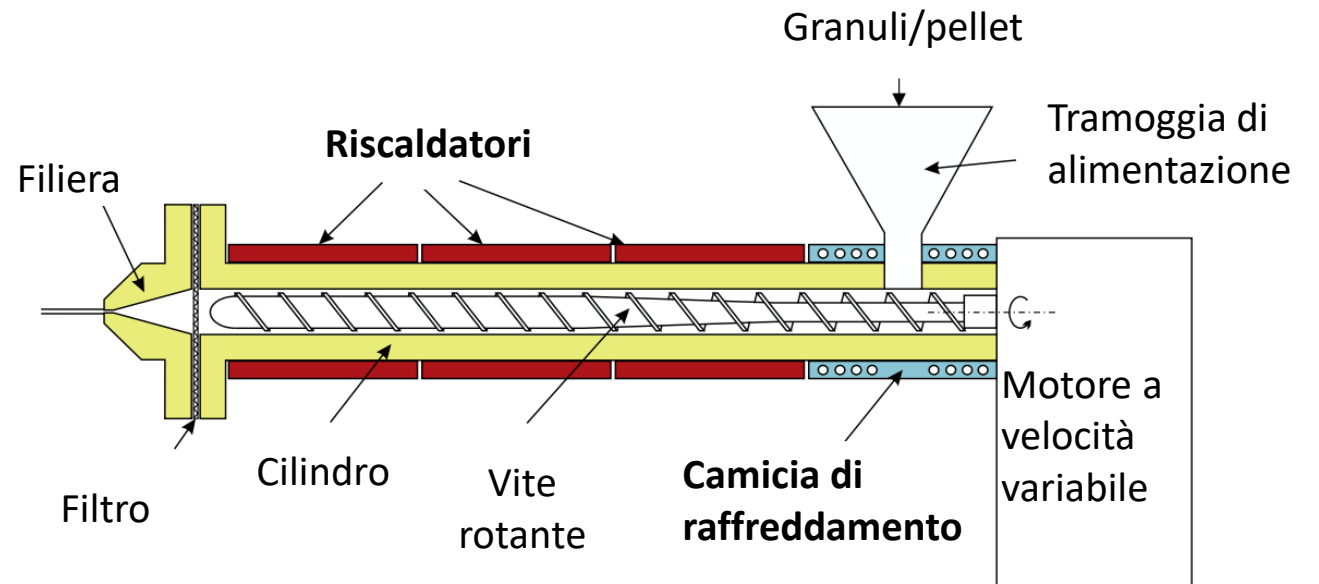
1. Si forma un sottile strato di materiale fuso sulla parete del cilindro. La rotazione della vite raschia questo film e la plastica fusa si muove
2. I granuli solidi sono compressi tra il filetto della vite, la parete del nocciolo e del cilindro, e tendono a essere inglobati nel fuso dal movimento rotatorio.
3. Man mano che la vite ruota, il materiale si muove lungo il cilindro fino a fusione completa.

→ La quantità di materiale immesso nella zona di alimentazione deve essere calcolato in base alla portata nella zona di dosatura.

1. Estrusione

Anche il riscaldamento e il raffreddamento esterni dell'estrusore svolgono un ruolo importante nel processo di fusione.

- Negli estrusori ad alto rendimento il materiale passa lungo il cilindro così rapidamente che il calore sufficiente per la fusione è generato dall'azione di taglio e i riscaldatori del cilindro non sono necessari. In queste circostanze è il raffreddamento del cilindro a essere critico se si genera un eccesso di calore nella fusione.
- In alcuni casi, la vite può essere raffreddata: per ridurre l'effetto di attrito tra la plastica e la vite.

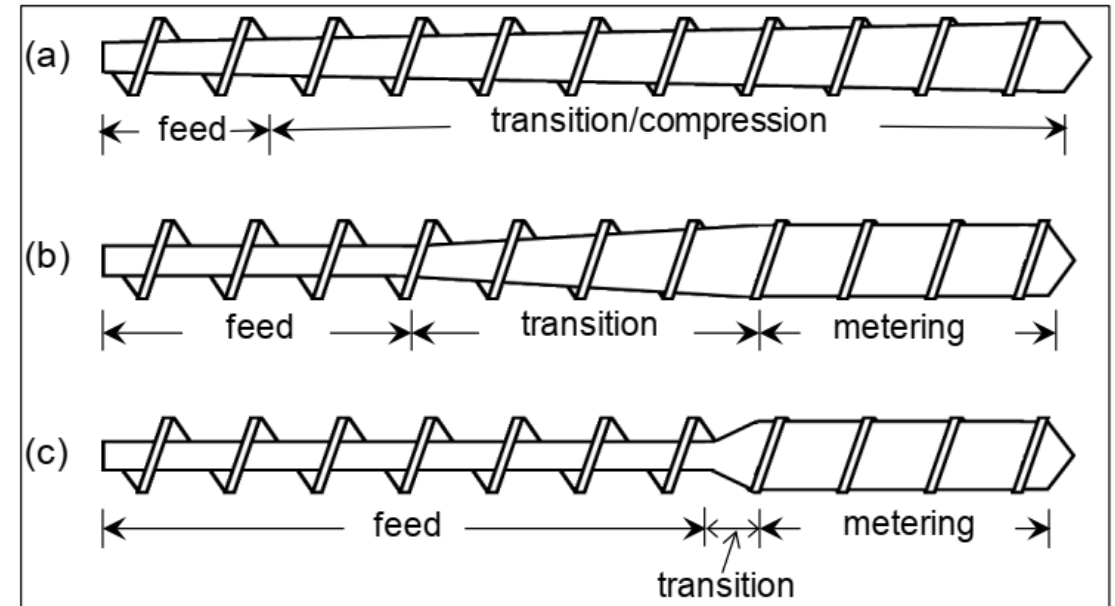


1. Estrusione - Modelli di vite

Il diametro del nocciolo varia a seconda della zona dell'estrusore (alimentazione, compressione, dosatura)

Esistono diversi modelli di vite che vengono utilizzati, a seconda del tipo di polimero lavorato:

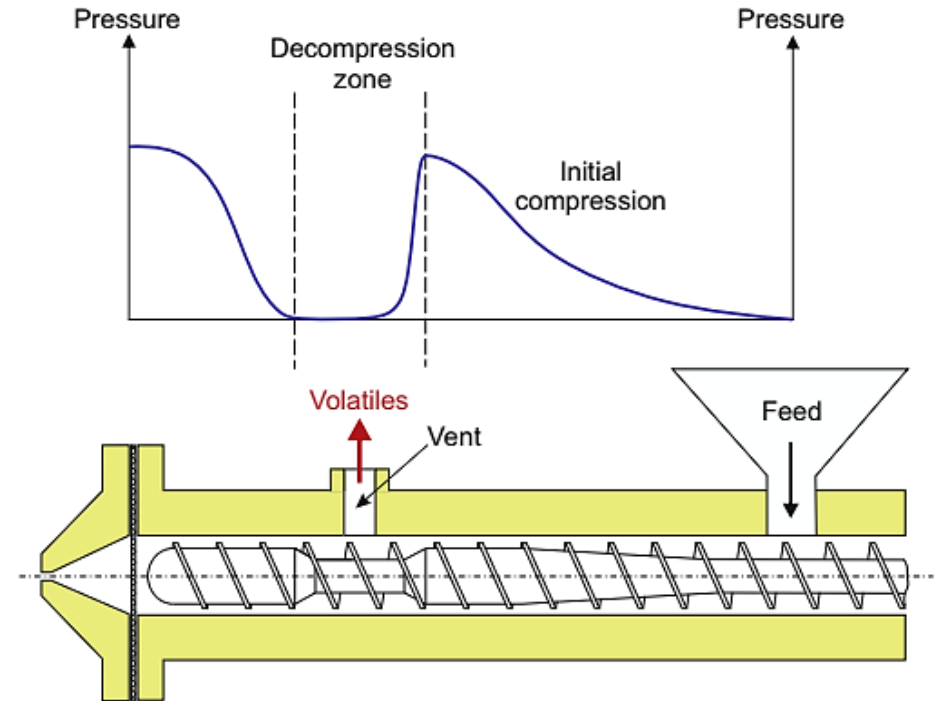
- a) vite adatta a **polimeri** con temperatura di rammollimento molto graduale o **sensibili al calore**, ad esempio il **PVC**;
- b) vite per polimeri con temperatura di fusione/ammorbidimento ampia, ad esempio il **PE**;
- c) vite per **polimeri con un intervallo di temperatura di fusione stretto**, ad esempio il **PA**.



1. Estrusione

Alcuni estrusori hanno anche una **zona di sfiato (venting)**. Alcune materie plastiche sono igroscopiche e se vengono estrusi in un'apparecchiatura convenzionale, la qualità dell'output può essere scarsa a causa del vapore acqueo intrappolato nella massa fusa.

- Nella prima parte i granuli vengono fusi, compressi e omogeneizzati nel modo consueto.
- Zona di decompressione: la pressione viene ridotta alla pressione atmosferica che consente la fuoriuscita dei volatili dalla massa fusa attraverso uno sfiato.
- Il fuso polimerico passa in una seconda zona di compressione prima di entrare in una sezione di dosatura finale.



1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

Quando la vite ruota all'interno del cilindro, **il movimento della plastica lungo la vite dipende dall'adesione alla vite e al cilindro.**

In teoria esistono due estremi:

- il materiale aderisce solo alla vite e quindi la vite e il materiale ruotano come un cilindro solido all'interno del cilindro. Ciò comporterebbe un rendimento nullo ed è chiaramente indesiderabile.
- nel secondo caso, il materiale scivola sulla vite e presenta un'elevata resistenza alla rotazione all'interno del cilindro. Ciò comporta un movimento puramente assiale della fusione e rappresenta la situazione ideale.

Il comportamento è intermedio tra questi limiti, poiché il materiale aderisce sia alla vite che al cilindro.

1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

Obiettivo: descrivere le condizioni di flusso dell'estrusore nella zona di dosaggio (*metering*) per poter effettuare delle scelte progettuali.

L'output dell'estrusore è il risultato di:

1. Un flusso di trascinamento
2. Un flusso dovuto al gradiente di pressione (contrario!)
3. Un flusso di perdita (contrario!)

La derivazione dell'equazione di output presuppone che:

- Nella zona di dosaggio la massa fusa abbia una **viscosità costante** (fluido newtoniano);
- Il **flusso sia isotermico** in un canale largo (condizioni molto probabili nella zona di dosaggio).

1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

1. Flusso di trascinamento

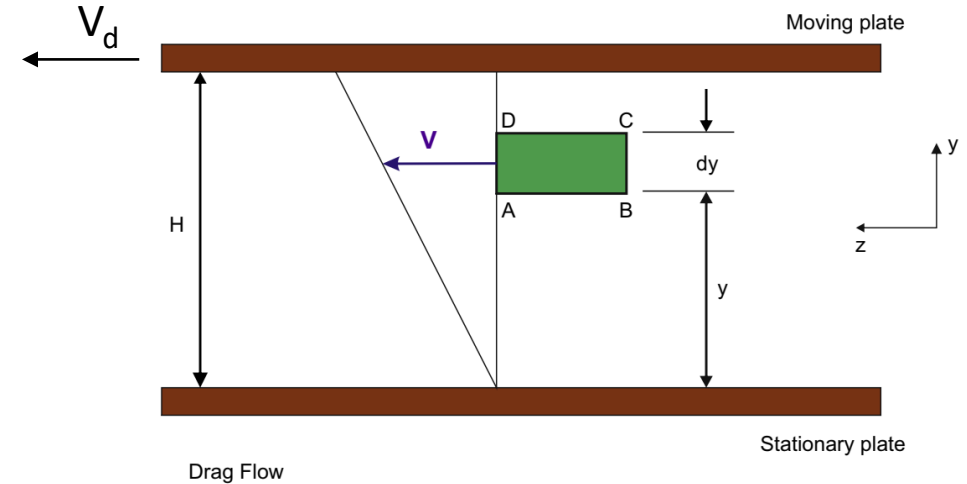
Per il piccolo elemento di fluido ABCD la portata volumetrica è:

$$dQ = V \cdot dy \cdot dx$$

Supponendo che il gradiente di velocità sia lineare $V = V_d \left[\frac{y}{H} \right]$

La portata dovuta al flusso di trascinamento Q_d è

$$Q_d = \int_0^H \int_0^T \frac{V_d y}{H} dy dx = \frac{1}{2} THV_d$$



V_d = velocità della piastra in movimento

$AB = dz$

H = altezza del canale

dx = larghezza dell'elemento

T = larghezza del canale

1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

1. Flusso di trascinamento

Considerando il caso dell'estrusore, dove il fluido viene trascinato dal movimento relativo della vite e del cilindro e N è la velocità della vite (giri per unità di tempo)

$$V_d = \pi D N \cos \phi$$

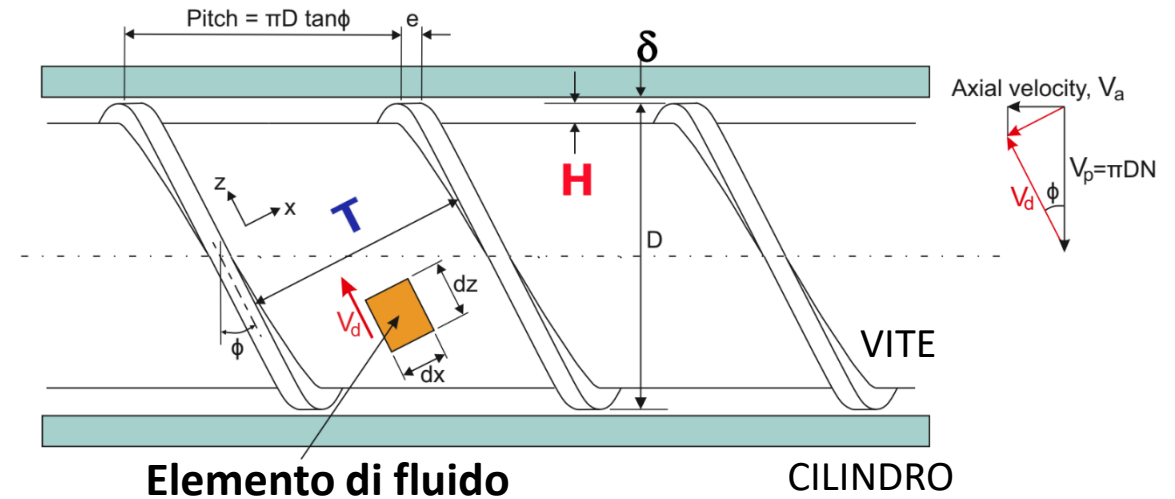
$$T = (\pi D \tan \phi - e) \cos \phi$$

$$Q_d = \frac{1}{2} (\pi D \tan \phi - e) (\pi D N \cos^2 \phi) H$$

Il termine e è piccolo se confrontato con $(\pi D N \tan \phi)$, quindi l'espressione della **Portata dovuta al flusso di trascinamento** si riduce a

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

La velocità di taglio è data da V_d / H



1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

2. Flusso di pressione

Le **forze** che agiscono sull'elemento di fluido ABCD sono

$$F_1 = \left(P + \frac{\partial P}{\partial z} \cdot dz \right) dy dx \quad F_2 = P \cdot dy dx \quad F_3 = \tau_y dz dx$$

Dove P è la pressione $d\tau$ è lo stress di taglio sull'elemento
Per un **flusso stazionario** le forze sono in equilibrio

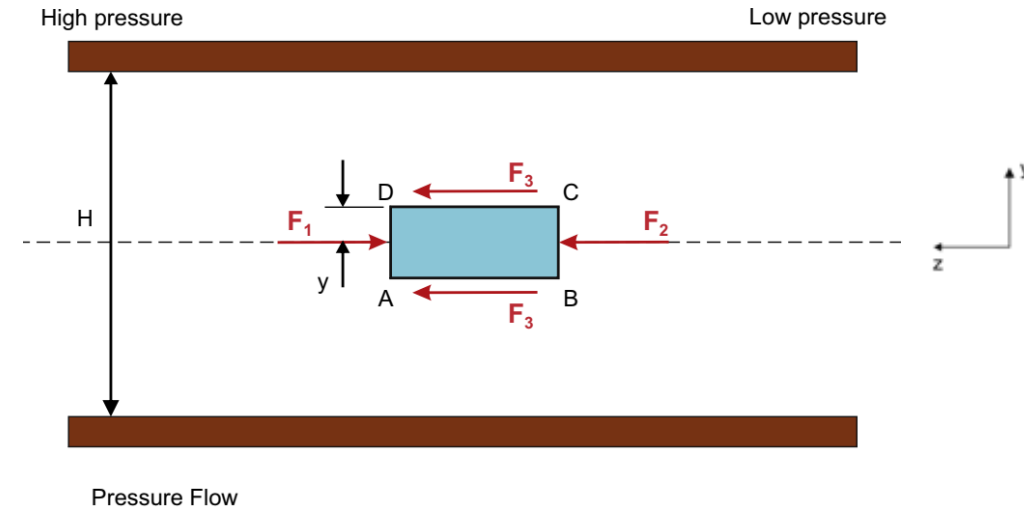
$$F_1 = F_2 + F_3 \quad \longrightarrow \quad y \frac{dP}{dz} = \tau_y$$

Per un fluido Newtoniano

$$\tau_y = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{dV}{dy} \quad \longrightarrow \quad y \frac{dP}{dz} = \eta \frac{dV}{dy}$$

Quindi la **velocità** è

$$\int_0^v dV = \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz} \int_{H/2}^y y dy \quad \longrightarrow \quad V = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dz} \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right)$$



AB = dz

H = altezza del canale

dx = larghezza dell'elemento

T = larghezza del canale

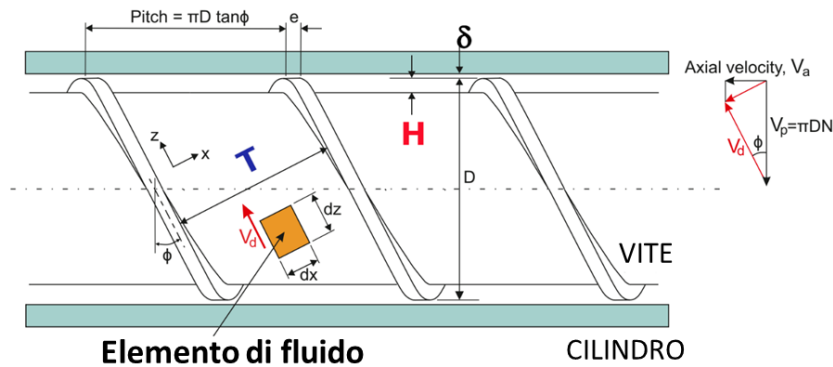
V = velocità dell'elemento

1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

2. Flusso di pressione

Per l'elemento di fluido di profondità dy , a distanza y dalla linea centrale (e la cui velocità è V) la portata dQ è data da

$$dQ = VT \, dy \longrightarrow Q_p = 2 \int_0^{H/2} \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz} \cdot T \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) dy \longrightarrow Q_p = -\frac{1}{12\eta} \frac{dP}{dz} \cdot TH^3$$



Considerando il caso dell'estrusore

$$T = \pi D \tan \phi \cdot \cos \phi$$

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

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

Portata dovuta al flusso di pressione è

$$Q_p = -\frac{\pi DH^3 \sin^2 \phi}{12\eta} \cdot \frac{dP}{dL}$$

1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

3. Flusso di perdita

Il flusso di perdita è un flusso di pressione attraverso un canale largo un giro di elica ($\pi D / \cos \phi$), lungo ($e \cos \phi$) e con un'altezza pari a δ . Il flusso si muove in direzione x ed è costante in tutti i punti sopra il filetto.

Per quanto visto nell'analisi di «2. flusso di pressione», tra le pareti di due filetti consecutivi avremo un certo gradiente di pressione: $\frac{dP}{dz}$

mentre $\frac{dP}{dx} = \frac{dP}{dy} = 0$

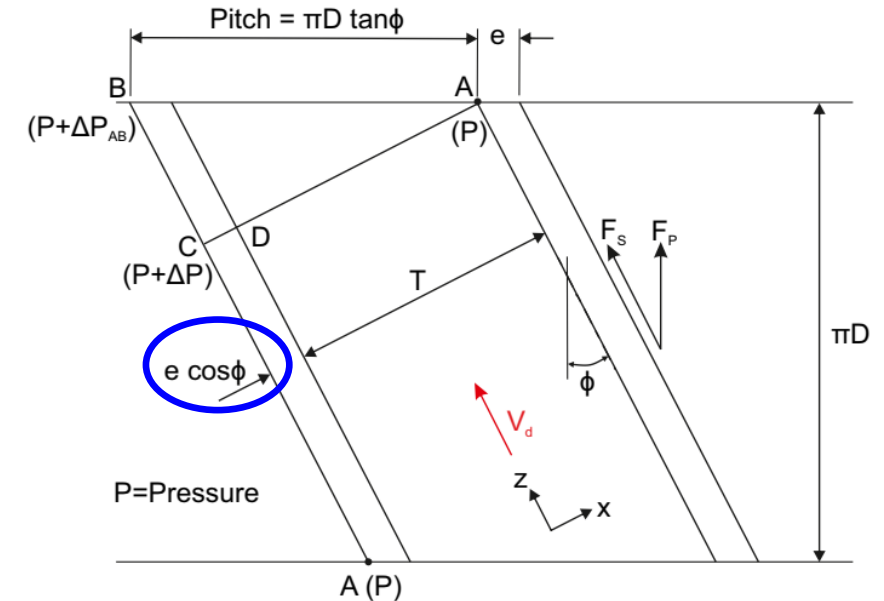
Allora: $P(A) \equiv P(D)$.

Questo significa che la variazione di pressione lungo lo sviluppo della vite AC corrisponde alla variazione di pressione lungo il tratto $e \cos \phi$.

Dato che $\frac{dP}{dz}$ è lineare:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P}{AC} = \frac{\Delta P_{CD}}{e \cos \phi} \quad \text{ma poiché } P(A) \equiv P(D) \rightarrow$$

$$\frac{\Delta P}{AC} = \frac{\Delta P}{e \cos \phi}$$



1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

3. Flusso di perdita

Quindi dobbiamo calcolare ΔP . Per farlo, seguiamo lo sviluppo della vite.

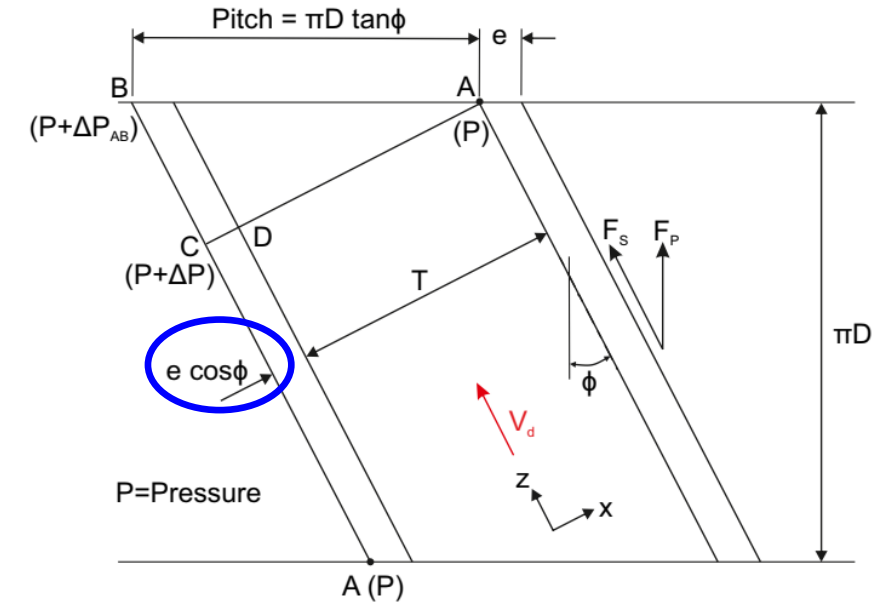
$$\Delta P = \Delta P_{AB} \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \Delta P_{AB} \frac{AB - BC}{AB} = \Delta P_{AB} \frac{\frac{\pi D}{\cos \phi} - \pi D \tan \phi \sin \phi}{\frac{\pi D}{\cos \phi}}$$

Semplificando: $\Delta P = \Delta P_{AB} \cdot \cos^2 \phi$

$$\text{ma: } \Delta P_{AB} = \pi D \tan \phi \frac{dP}{dL} \longrightarrow \Delta P = \pi D \tan \phi \cos^2 \phi \frac{dP}{dL}$$

In conclusione:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P}{AC} = \frac{\Delta P}{e \cos \Phi} = \frac{\pi D}{e} \tan \Phi \cos \Phi \frac{dP}{dL}$$



1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

3. Flusso di perdita

Data l'equazione della portata, derivata nel caso precedente:

$$Q_p = -\frac{1}{12\eta} \frac{dP}{dz} \cdot TH^3$$

Si possono fare le seguenti sostituzioni:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\pi D}{e} \tan \phi \cos \phi \frac{dP}{dL}$$

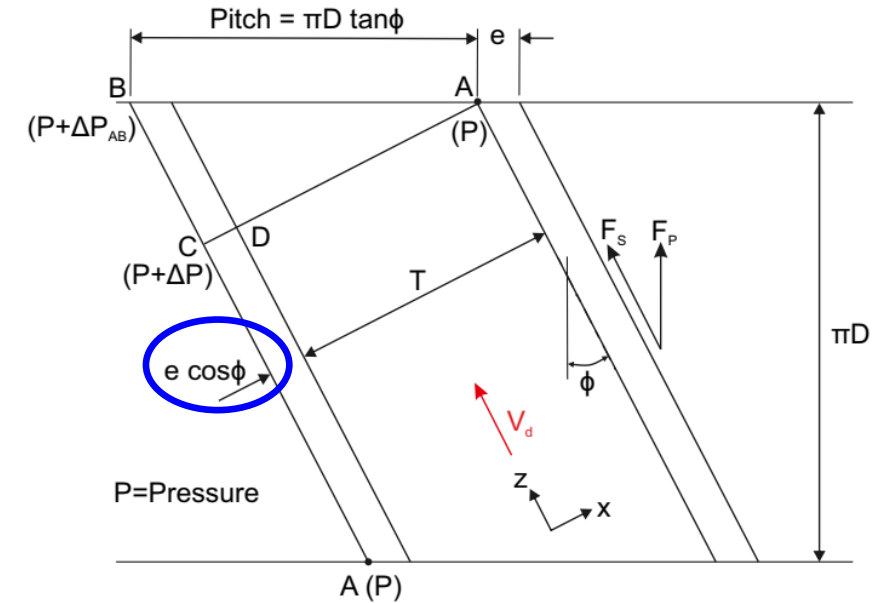
$$H = \delta$$

$$T = \pi D / \cos \phi \longrightarrow \text{Segmento ACB}$$

Sostituendo i termini trovati, si ottiene:

Portata dovuta al flusso di perdita

$$Q_L = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12\eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL}$$



1. Estrusione - Analisi del flusso nell'estrusore

Il Flusso totale è dato dalla somma dei 3 contributi: Trascinamento, Pressione e Perdita

$$Q = \underbrace{\frac{1}{2}\pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi}_{\text{Trascinamento}} - \underbrace{\frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12\eta} \frac{dP}{dL}}_{\text{Pressione}} - \underbrace{\frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12\eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL}}_{\text{Perdita}}$$

- Per molti scopi pratici si può trascurare il termine di flusso di perdita.
- Il gradiente di pressione viene considerato lineare

$$\frac{dP}{dL} = \frac{P}{L}$$

1. Estrusione - Analisi del flusso all'uscita dell'estrusore

$$Q = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12\eta} \frac{dP}{dL} - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12\eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL}$$

Per l'equazione del flusso di uscita dall'estrusore ci sono due situazioni interessanti da considerare

1. Deflusso libero: non c'è accumulo di pressione all'estremità dell'estrusore

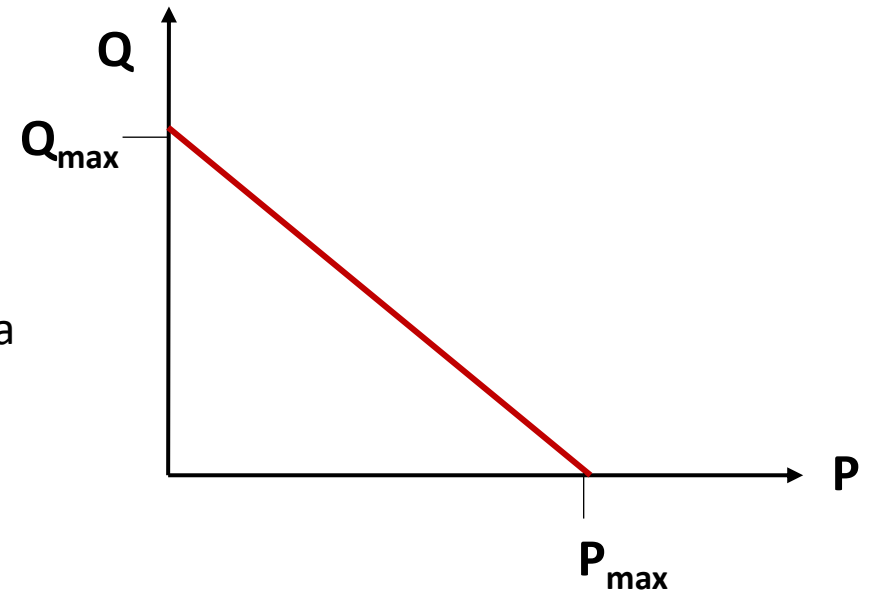
$$\rightarrow \Delta P = 0$$

$$Q = Q_{\max} = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi$$

2. Deflusso bloccato: la pressione è tale da bloccare il flusso all'uscita

$$\rightarrow Q = 0$$

$$P = P_{\max} = \frac{6\pi D L N \eta}{H^2 \tan \phi}$$



1. Estrusione - Analisi del flusso della filiera

È interessante notare che quando una filiera è accoppiata all'estrusore i loro requisiti sono contrastanti.

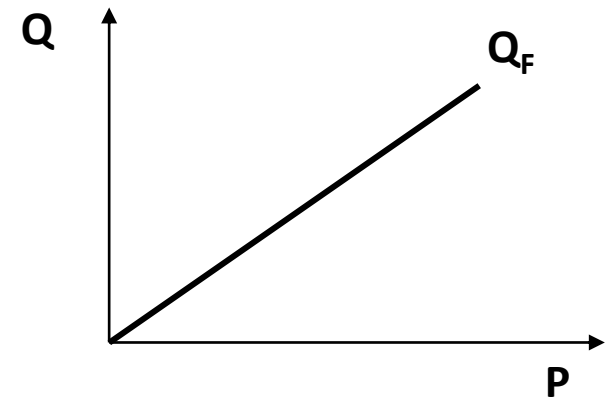
- L'estrusore ha una resa elevata se la pressione in uscita è bassa.
- La produzione della filiera aumenta con la pressione in ingresso.

La portata in uscita (Q) di un fluido newtoniano da una filiera è data da

$$Q = KP$$

Per una filiera capillare, di raggio R e lunghezza L_d , K vale

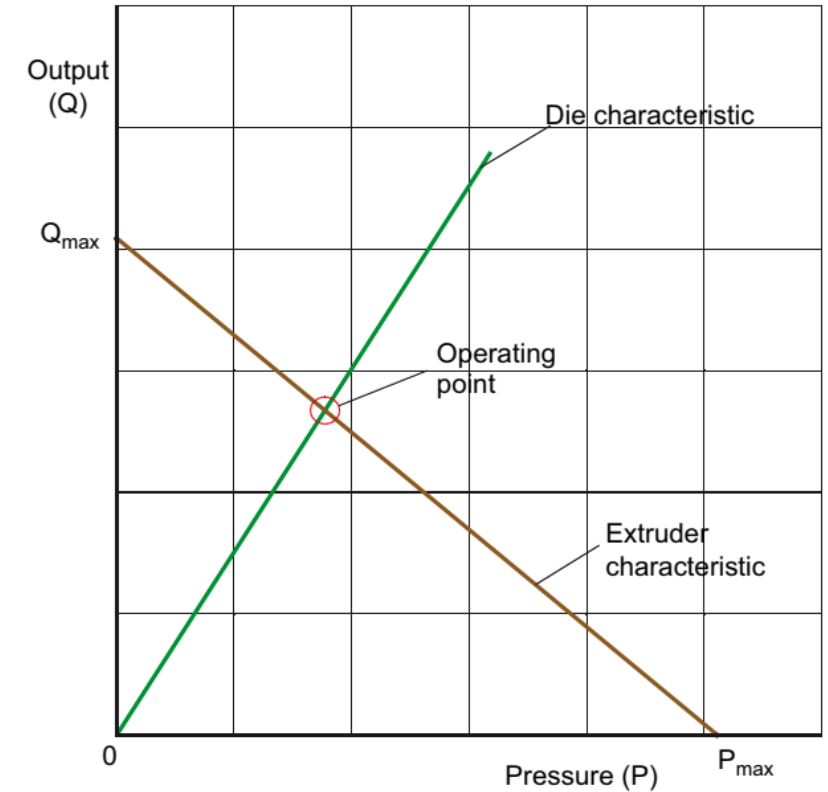
$$K = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d}$$



1. Estrusione - Punto di lavoro dell'estrusore

Trascurando il flusso di perdita il punto di funzionamento può essere determinato da

$$Q = \underbrace{\frac{1}{2}\pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi}_{\text{Trascinamento}} - \underbrace{\frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12 \eta} \frac{P}{L}}_{\text{Pressione}} = \underbrace{\frac{\pi R^4}{8 \eta L_d}}_{\text{Filiera}} \cdot P$$

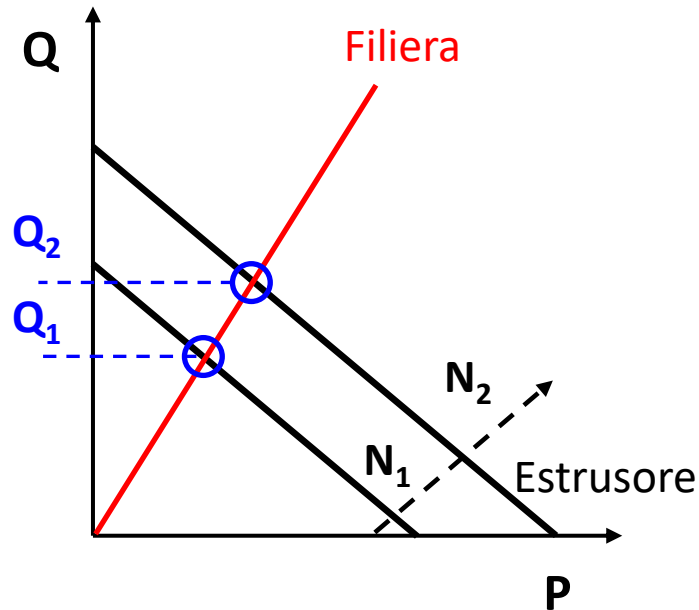


1. Estrusione - Punto di lavoro dell'estrusore

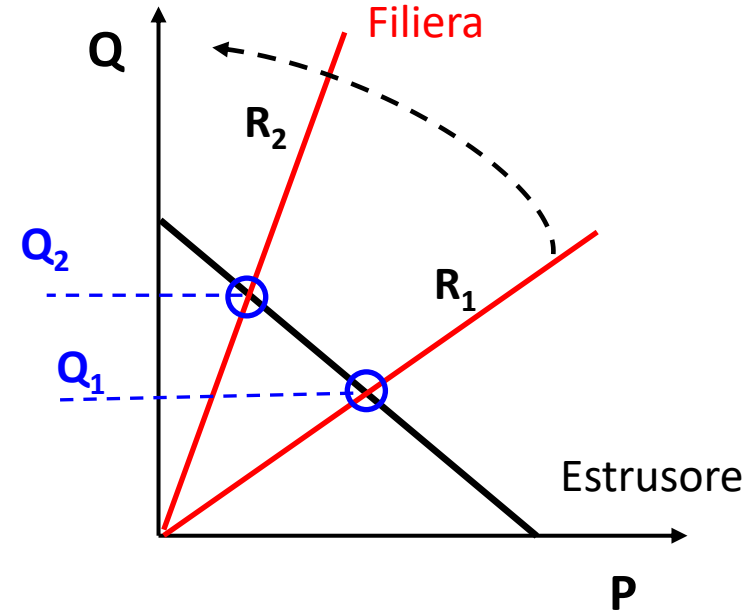
$$Q = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12 \eta} \frac{P}{L} = \frac{\pi R^4}{8 \eta L_d} \cdot P$$

Se la velocità della vite N aumenta

$$N_1 < N_2$$

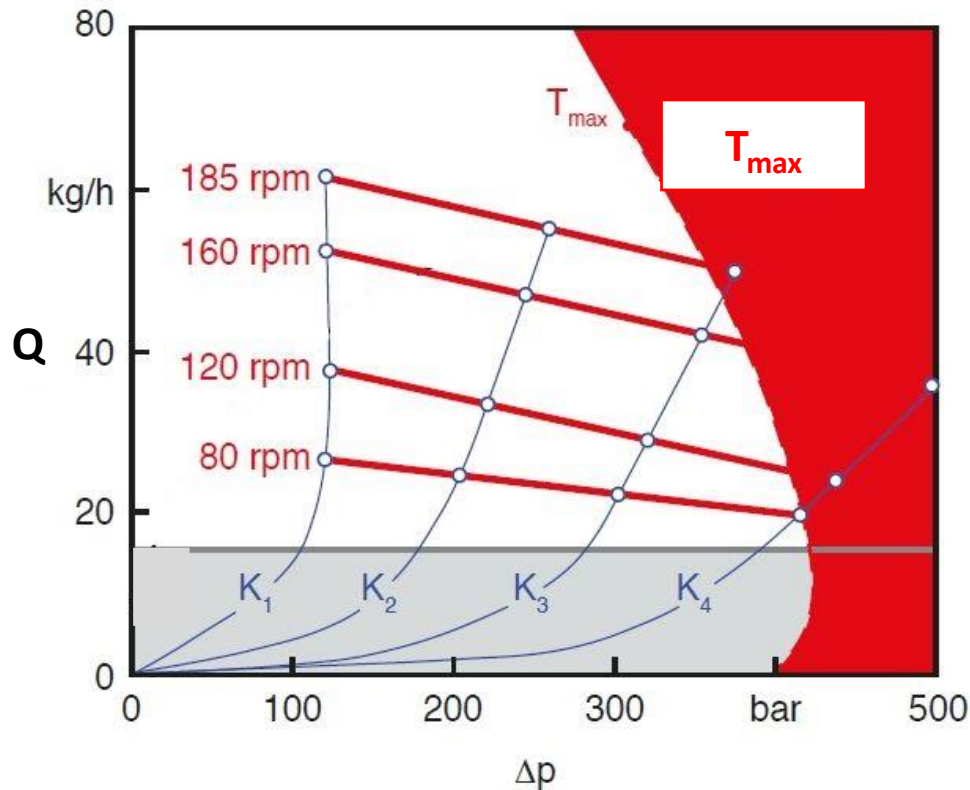


Se aumenta il raggio R della filiera
 R_1 (film sottili) < R_2 (fogli)



1. Estrusione - Punto di lavoro dell'estrusore

Curve caratteristiche di vite e filiera per un estrusore di 45 mm di diametro per LDPE



- Le curve caratteristiche della filiera sono K_1 , K_2 , K_3 e K_4 in ordine crescente di restrizione della filiera: K_1 rappresenta una filiera a bassa resistenza (lastra spessa), e K_4 rappresenta una filiera più restrittiva (pellicola).
- Le curve caratteristiche all'uscita dell'estrusore sono a diverse velocità di rotazione N .
- T_{max} rappresenta le condizioni in cui si raggiungono temperature eccessive a causa del riscaldamento dovuto all'attrito e agli sforzi di taglio.

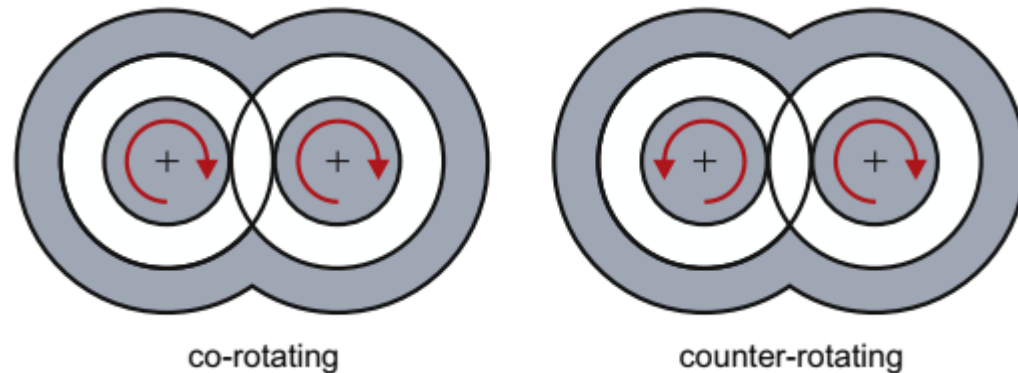
1. Estrusione - Estrusori a doppia vite

In generale, gli estrusori a doppia vite consentono una gamma più ampia di possibilità in termini di velocità di produzione, efficienza di miscelazione, generazione di calore, ecc. rispetto a un estrusore monovite.

Sono diventati sempre più importanti per superare alcune delle sfide inerenti al successo dell'estrusione di materiali che richiedono alti gradi di miscelazione o di controllo della temperatura (ad esempio, come nei nanocompositi polimerici o nei polimeri medico-farmaceutici).

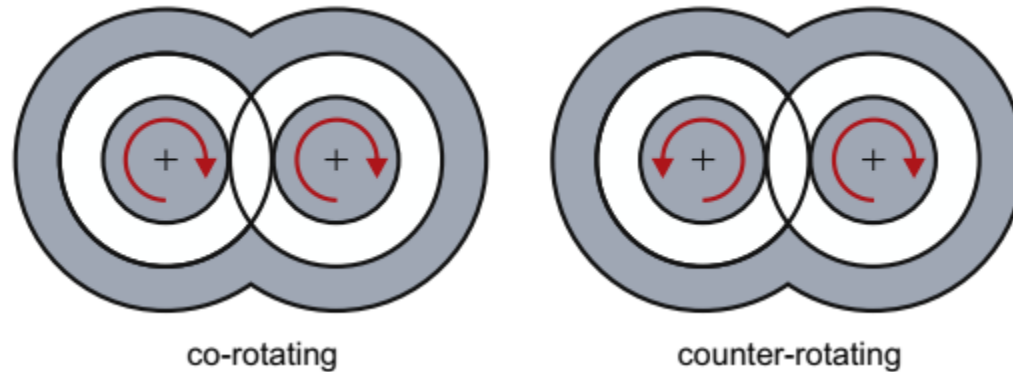
Possono essere classificate in base a due criteri principali:

1. direzioni di rotazione delle viti:
2. posizione reciproca delle viti



1. Estrusione - Estrusori a doppia vite

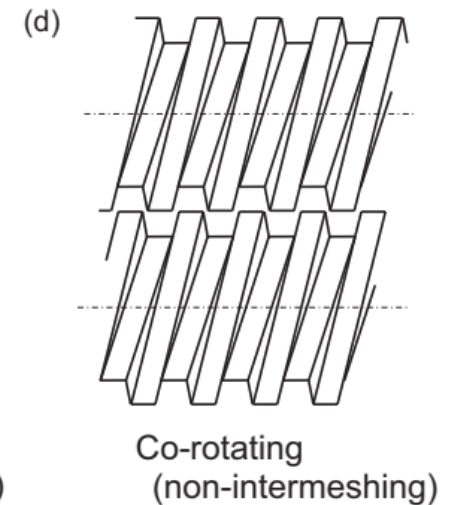
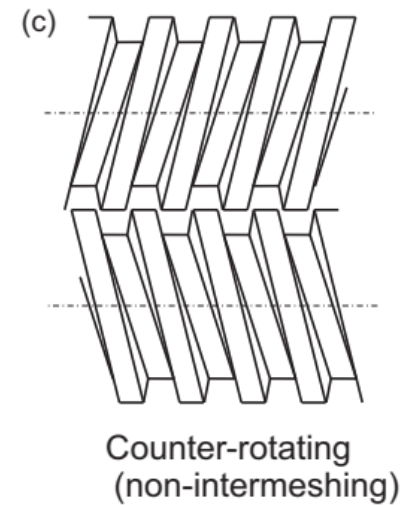
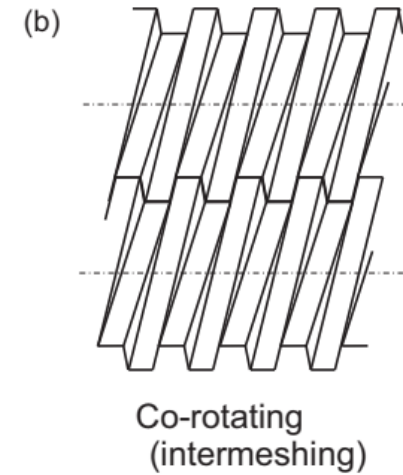
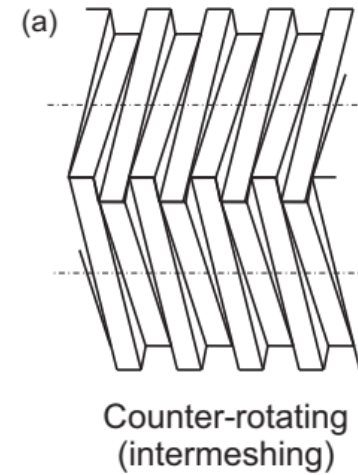
- Co-rotanti se ruotano nella stessa direzione: il materiale viene trasferito da una vite all'altra, è adatto per i materiali sensibili al calore, perché il materiale viene trasportato rapidamente attraverso l'estrusore. Il movimento attorno alle viti è più lento se le viti sono coniugate, ma l'azione propulsiva è maggiore.
- Contro-rotanti se ruotano in direzioni opposte: il materiale viene compresso tra due rulli controrotanti (un meccanismo simile a quello della calandratura).



1. Estrusione - Estrusori a doppia vite

Posizione reciproca delle viti: le viti sono
a) e b) compenetrate se le alette di una
(o di entrambe) penetrano nel canale
dell'altra.

c) e d) non compenetrano se i filetti di
ciascuna vite sono tangenziali o separati
(processo di trasporto simile a quello di
un estrusore vite singola).



1. Estrusione - Estrusori a doppia vite

Confronto tra le prestazioni di un estrusore monovite e i principali tipi di estrusori bivite.

		Co-rotating screw		
Type	Single screw	Low speed type	High speed type	Counter-rotating twin screw
Principle	Friction between cylinder and materials and the same between material and screw	Mainly depend on the frictional action as in the case of single screw extruder		Forced mechanical conveyance based on gear pump principle
Conveying Efficiency	Low	Medium		High
Mixing efficiency	Low	Medium/High		High
Shearing action	High	Medium	High	Low
Self-cleaning effect	Slight	Medium/High	High	Low
Energy efficiency	Low	Medium/High		High
Heat generation	High	Medium	High	Low
Temp distribution	Wide	Medium	Narrow	Narrow
Max. revolving speed (rpm)	100–300	25–35	250–300	35–45
Max. effective length of screw L/D	30–32	7–18	30–40	10–21

1. Estrusione

Numero di Deborah – recupero elastico

In uscita dall'estrusore può avvenire un recupero elastico, cioè un allargamento dimensionale

Il numero di Deborah stima l'effetto elastico durante il flusso: è il **rapporto tra il tempo di rilassamento del polimero λ e il tempo caratteristico di processo t_p** (= rapporto tra la dimensione caratteristica della filiera e la velocità media attraverso la filiera).

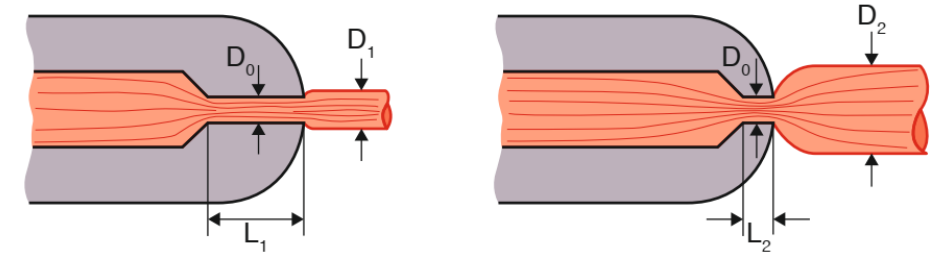
Un numero di Deborah pari a zero rappresenta un fluido viscoso e un numero di Deborah pari a ∞ un solido elastico.

Numero di Deborah > 1 : il polimero non ha tempo sufficiente per rilassarsi durante il processo, con conseguenti possibili deviazioni nelle dimensioni dell'estruso o irregolarità come il rigonfiamento dell'estruso la pelle di squalo o addirittura la frattura del fuso.

In pratica, il contributo della memoria di fluido al rigonfiamento della matrice può essere attenuato allungando la lunghezza della filiera.

Se la filiera è abbastanza lunga, il polimero "dimentica" la sua forma precedente.

$$De = \frac{\lambda}{t_p}$$



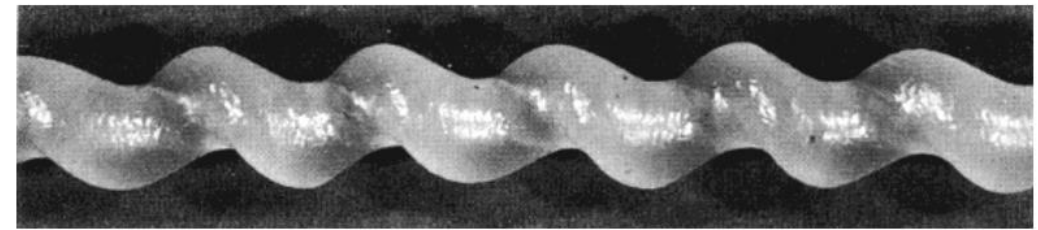
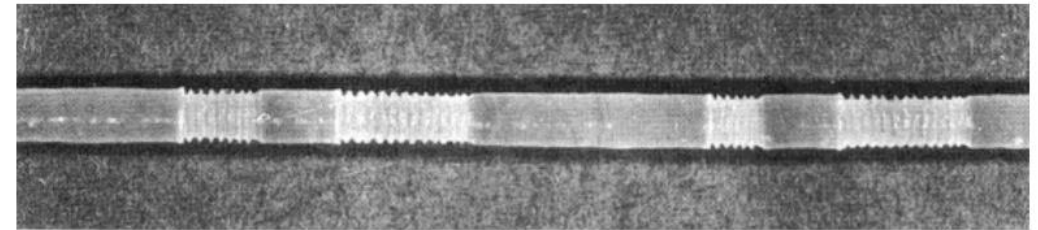
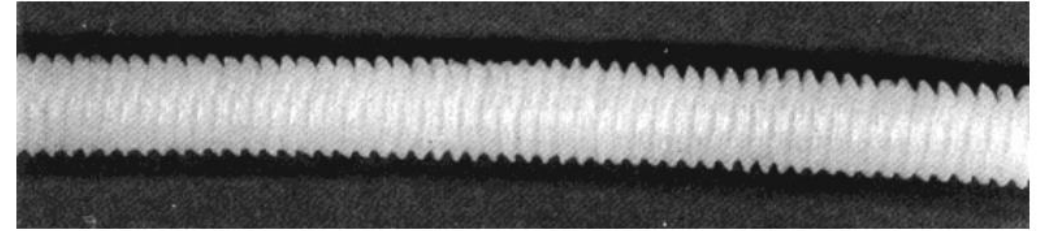
Rigonfiamento dell'estruso

1. Estrusione - Difetti

I difetti nell'estruso possono comparire anche a causa delle elevate velocità di estrusione che non consentono al polimero di rilassarsi.

L'immagine riporta dei tipici difetti:

- a) pelle di squalo (shark skin) (HDPE)
- b) separazione intermittente tra la massa fusa e le pareti interne della filiera (effetto stick-slip o spurt flow): questo fenomeno è attribuito alle elevate sollecitazioni di taglio tra il polimero e la parete della matrice
- c) se la velocità viene ulteriormente aumentata, viene estrusa una geometria elicoidale (PP)
- d) frattura da fusione: quando la velocità è tale si sviluppa un modello caotico.



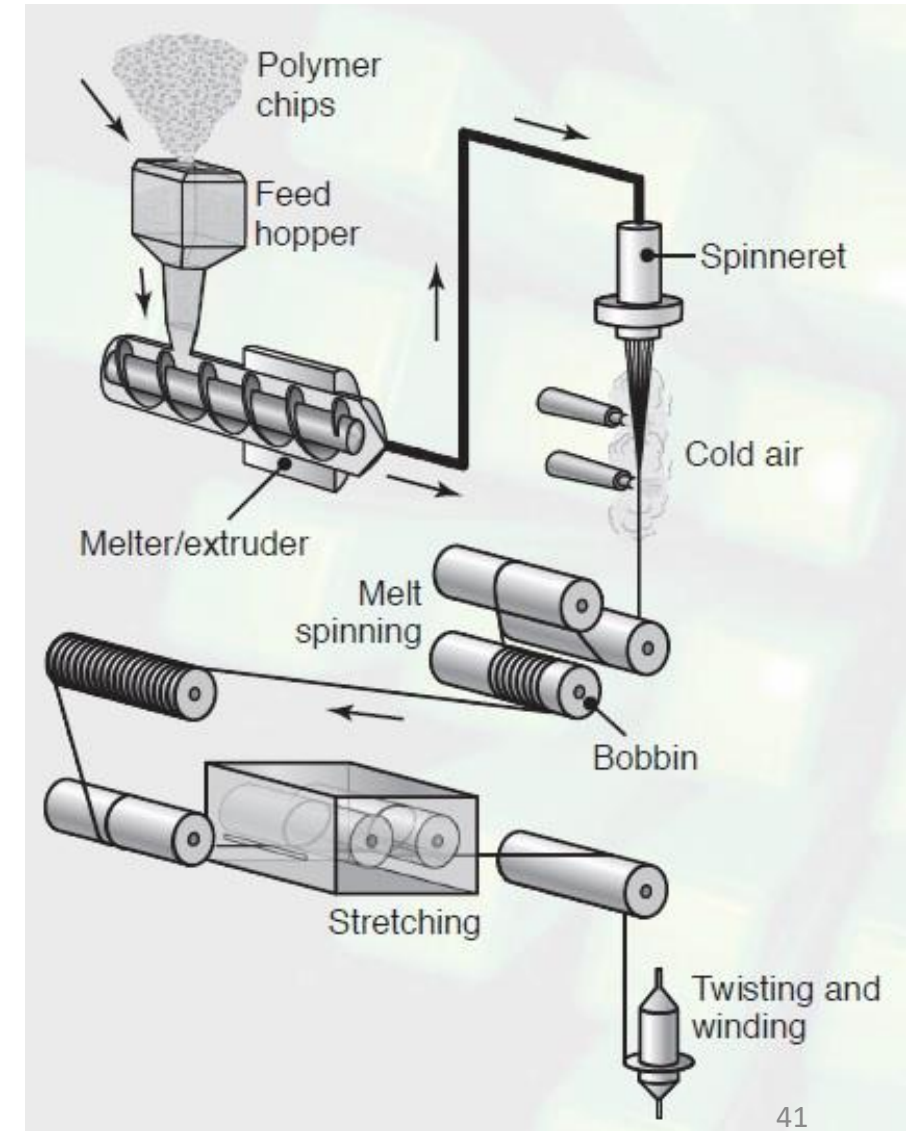
1. Estrusione

Altri processi basati sull'estrusione: Filatura dal fuso (melt spinning)

Produzione di fibre polimeriche

→ Tessuti

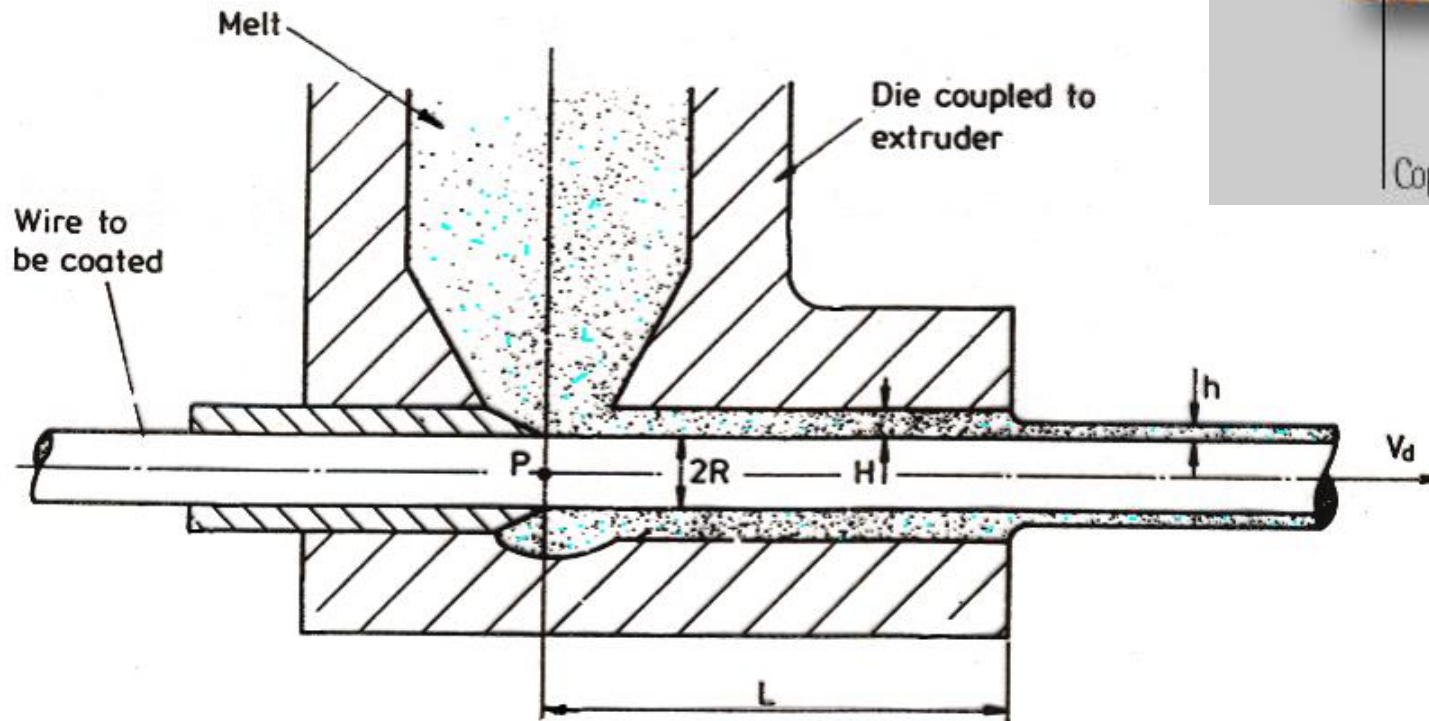
→ Rinforzi per compositi



1. Estrusione

Altri processi basati sull'estrusione: rivestimenti estrusi

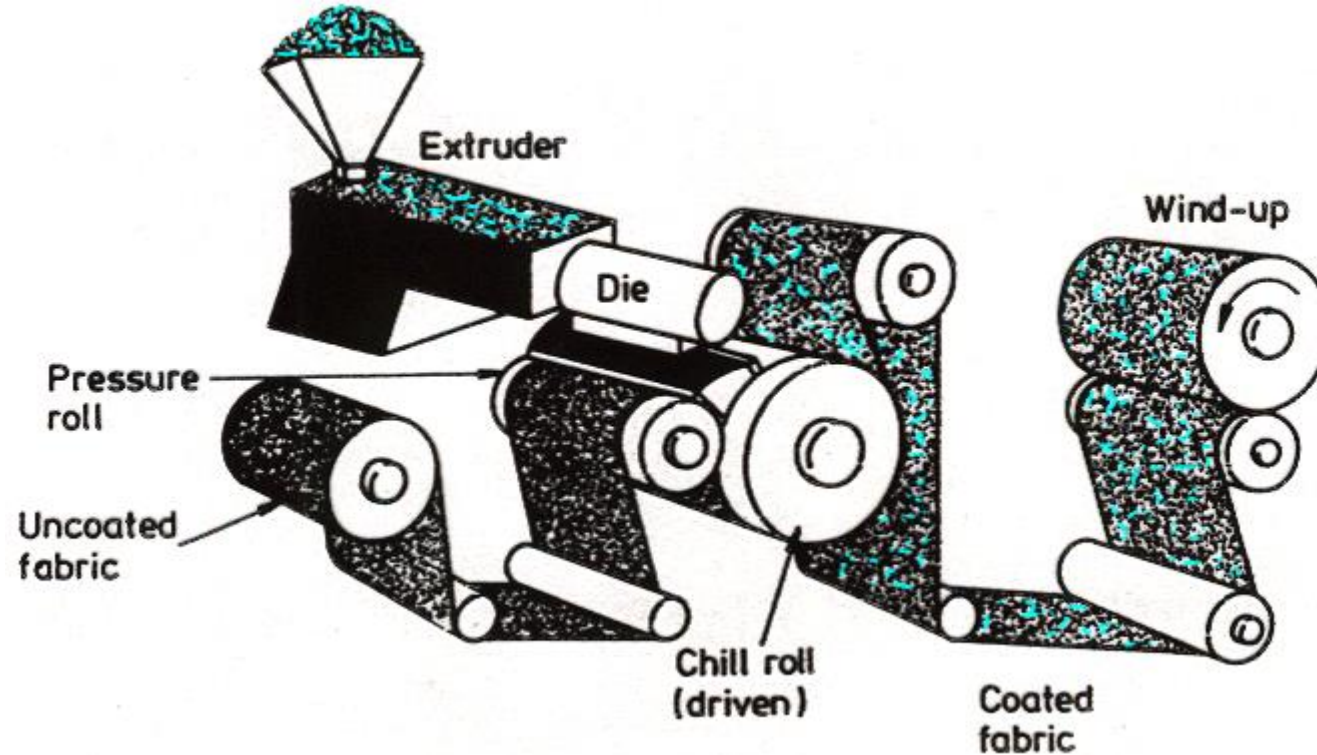
→ Tubi e fili



1. Estrusione

Altri processi basati sull'estrusione: rivestimenti estrusi

→ Tessuti



1. Estrusione

Altri processi basati sull'estrusione: produzione di multistrato (coestrusione)

