

# Extrusão de Polímeros

Antonio J. F. de Carvalho

# Sumário

## Introdução

- Principais conceitos necessários

- Introdução geral sobre a extrusão

## Extrusora de rosca simples

- Componentes básicos

- Elementos adicionais de mistura

- Roscas de duplo estágio

- Degasage, tela/filtro

- Alguns tipos de roscas simples

- Análise de fluxo nas extrusoras simples

- Alguns exemplos de roscas

## Visão geral da extrusora de rosca dupla

## Misturador Farrel

## Exemplo de alguns processos de extrusão e matrizes

## Dimensionamento de rosca

## Cabeçotes e matrizes

## Reologia da extrusão

## Extrusoras de rosca dupla

## Sistema de alimentação

## Termodinâmica e rendimento térmico

## Exemplos de extrusão, PP, PVC, Nylon, PET, Borracha

**Objetivo da presente aula:** Introduzir conceitos fundamentais sobre extrusão, principais tipos de extrusão, noções sobre fluxo de material.

A Extrusão de Polímeros faz parte da área que aborda o **processamento dos Polímeros**.

Processamento dos polímeros:

- Compostagem
- Produção de objetos com forma e aspecto definidos

Objetivo do processamento – Misturar, “aditivar” e dar forma em objetos diversos.

## Métodos de processamento

1-Deformação dos polímeros no estado fundido (melt) tanto termoplásticos como termofixos. (**extrusão**, moldagem por injeção, calandragem, termoformagem)

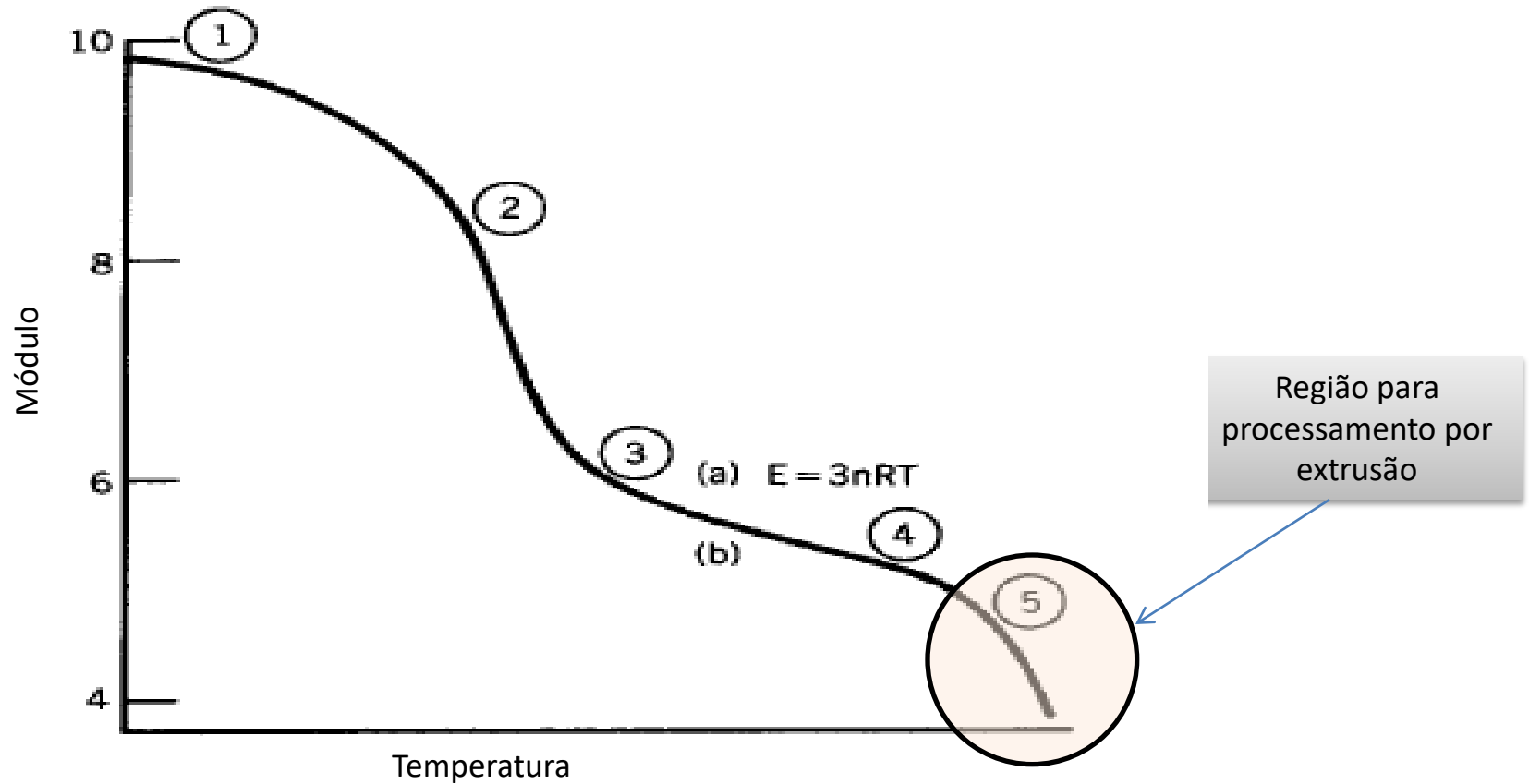
2-Deformação no estado borrachoso. (conformação assistida por vácuo e à pressão).

3-Processamento de soluções para a fabricação de filme ou fibras e filamentos.

4-Processamento de suspensões. Aplicável aos látex e suspensões.

5-Processamento de resinas de baixa massa molecular ou precursores de polímeros (placas (acrílico) e laminados de resina reforçada com vidro e outros materiais).

*Curva idealizada do módulo em função da temperatura para um polímero amorfo*



- 1 – Vítreo
- 2 – Transição vítrea
- 3 – Platô de borracha (semi-sólido)
- 4 – Fluxo de borracha (plástico)
- 5 – Fluxo viscoso (líquido viscoso)

## Principais conceitos necessários

1. Características higroscópicas do material
2. Características físicas do material (*peletes*, pós, aglomerantes, fibras, etc.)
3. Propriedades térmicas do polímero que influenciam a fusão
4. Propriedades de fluxo do material (“**Extrudabilidade**”)
5. Propriedades térmicas durante e após o resfriamento
6. Cristalização
7. Orientação e contração

# Extrusão

## Definição

No processo de extrusão o polímero é fundido e é forçado por meio de uma passagem. O material é então conformado em uma forma definida e resfriado. As extrusoras modernas empregam roscas para fundir, homogeneizar e forçar o material através da cabeça de extrusão.

## Produtos

### Composto ou compósito



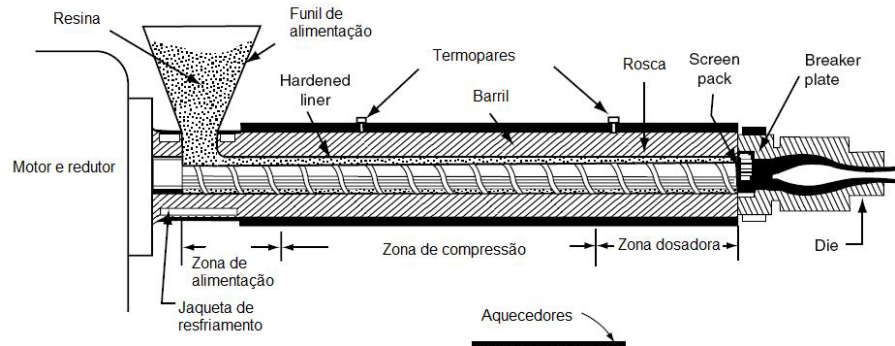
### Produto acabado ou semi-acabado



✓ Reator contínuo na síntese e modificação de polímeros

# Tipos de extrusora e características gerais do processo de extrusão

## Extrusora de Rosca Simples



## Extrusora de Rosca Dupla





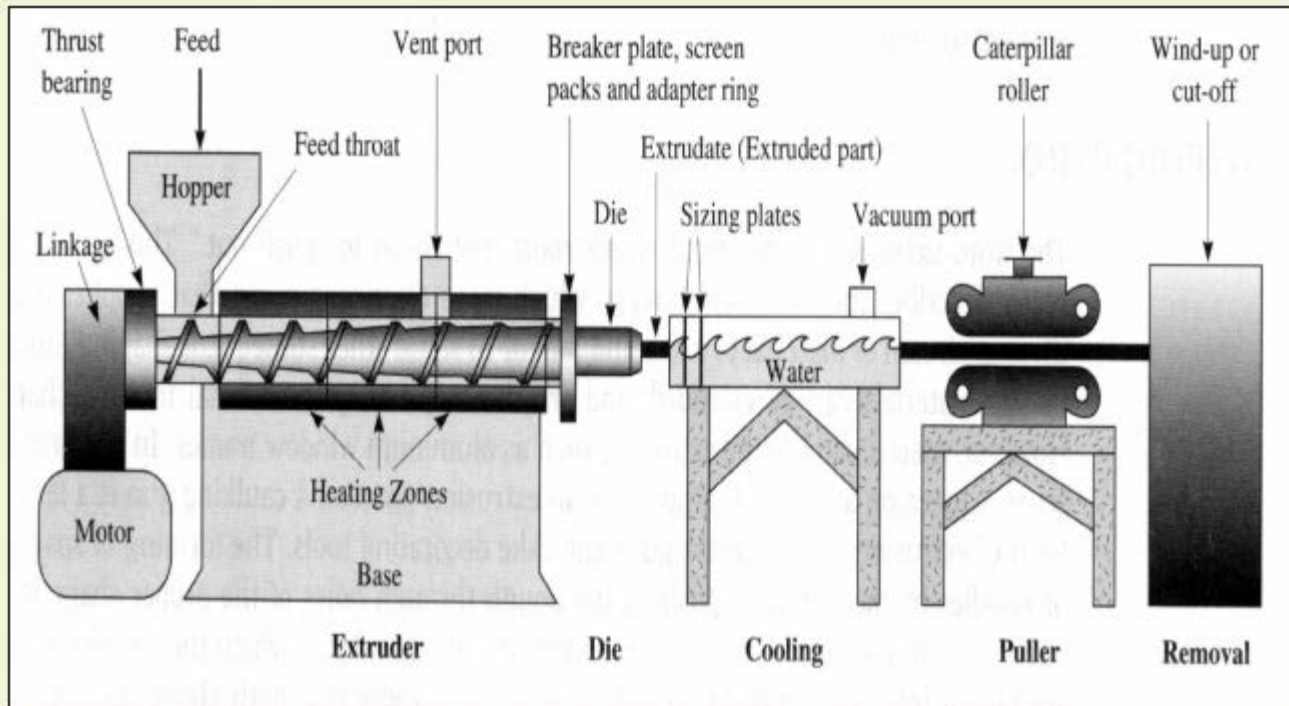
# Componentes da Extrusora

- Funil e zona de alimentação
- Sistema de aquecimento
- Zona de Plastificação e fusão
- Degasagem
- Cabeçote
  - Tela
  - Grade
  - Matriz
- Calha de resfriamento
- Recolhimento

## **Etapas fundamentais do processo de extrusão**

1. Alimentação do material
2. Transformação do material para o estado de líquido-viscoso (fundido)
3. Bombeamento do material através da matriz
4. Estabilização e resfriamento do extrudado
5. Recolhimento do extrudado

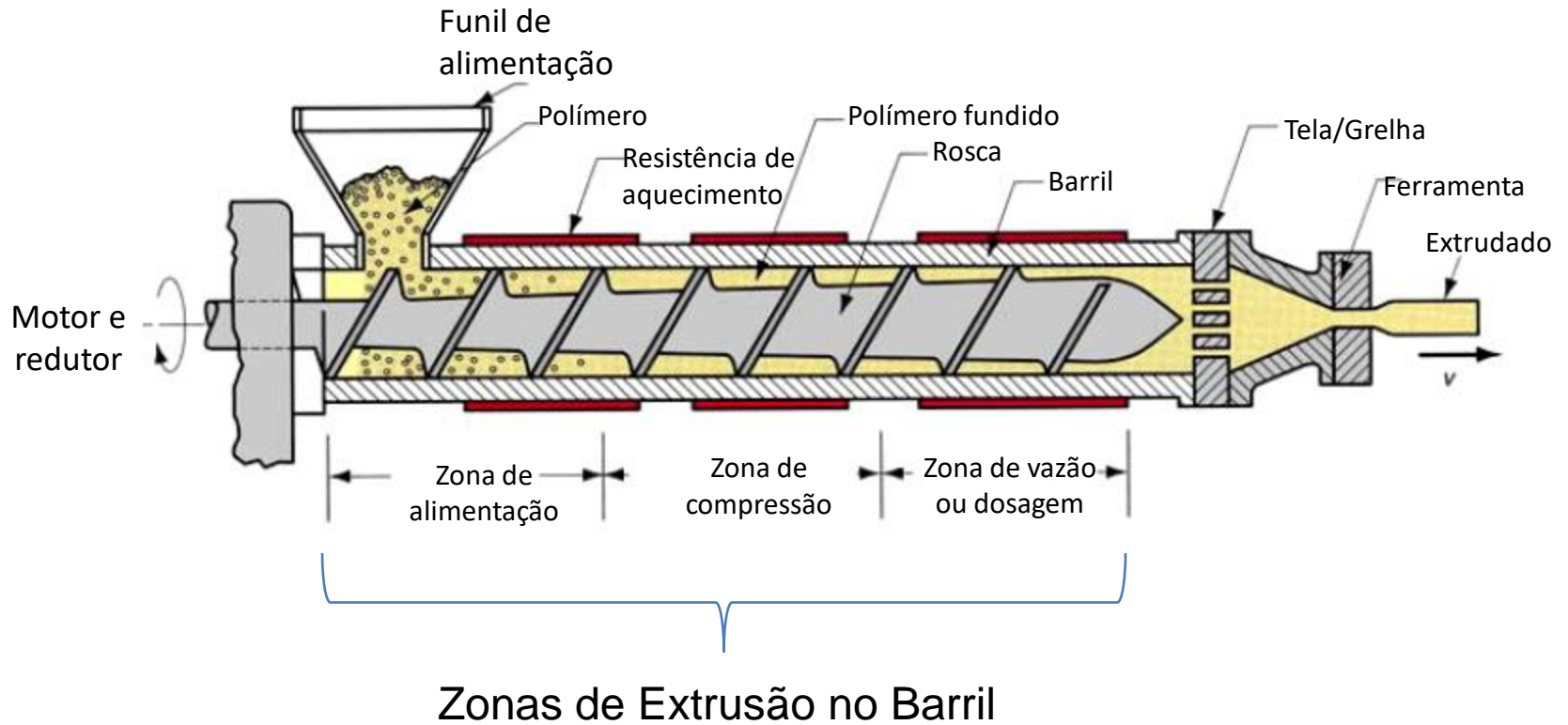
## Componentes básicos de uma extrusora



Granulador na cabeça

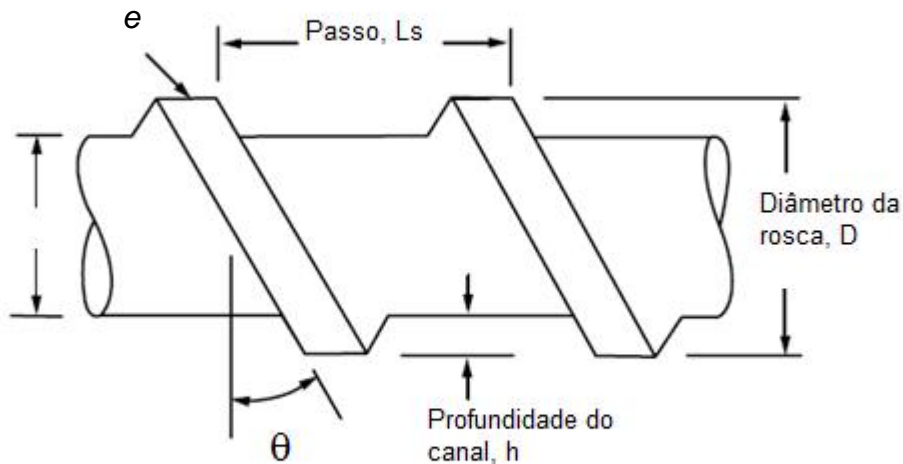
Outros sistemas, como filme por balão, filme plano biorientado, e outros

# Extrusora de Rosca Simples



## Extrusora de Rosca Simples

### Elementos básicos da rosca



$\delta$  é a distância canal-barril

**Obs.** Em geral o ângulo de inclinação do filete,  $\theta$ , (ângulo do hélice) é de 17,6 graus. Nessa situação o passo da rosca é igual ao seu diâmetro (rosca quadrada).  
 $L/D = \text{número de espiras}$

## Extrusora de Rosca Simples

Os dois principais parâmetros de uma extrusora de rosca simples

- ✓ Razão comprimento-diâmetro (L/D) 15:1 a 30:1
- ✓ Razão de compressão = profundidade do filete na zona de alimentação/profundidade do filete perto da cabeça 2:1 a 5:1

# Zona de Alimentação

- ✓ A profundidade do canal,  $h$ , é grande
- ✓ Deve pré-aquecer o material
- ✓ As propriedades de fricção do material sólido são fundamentais
- ✓ Pode ser necessário resfriamento no início junto ao funil

## Zona de Compressão

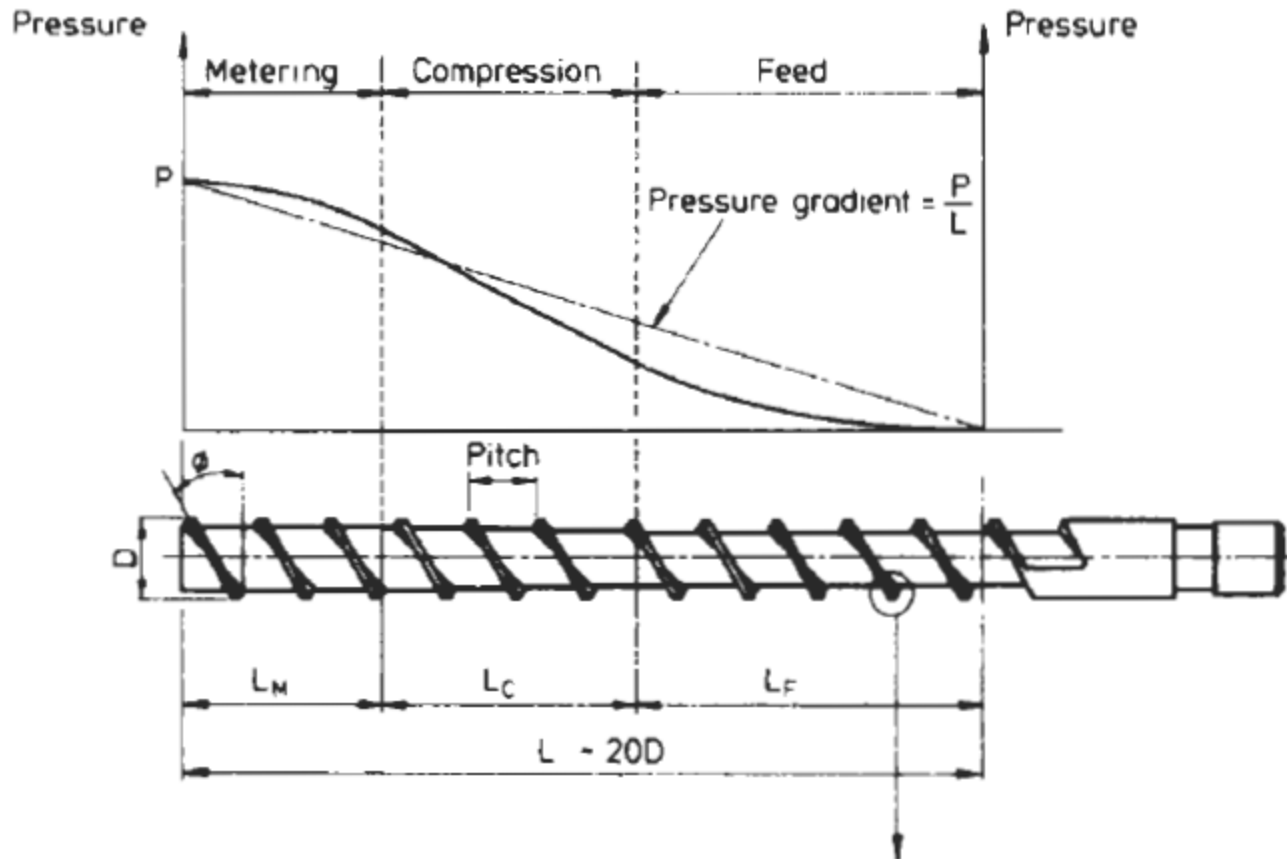
- ✓ A profundidade do canal,  $h$ , decresce gradualmente compactando o material
- ✓ Ocorre eliminação do ar para a zona de alimentação
- ✓ Aumento da pressão e do cisalhamento
- ✓ O material deve fundir totalmente ou parcialmente



## Zona de Dosagem ou Vazão

- ✓ A profundidade do canal,  $h$ , decresce gradualmente mas com menor intensidade que na zona de compressão
- ✓ Ocorre eliminação do ar para a zona de compressão
- ✓ Deve fornecer o material para o cabeça de forma constante
- ✓ Pressão e Temperatura devem ser uniformes

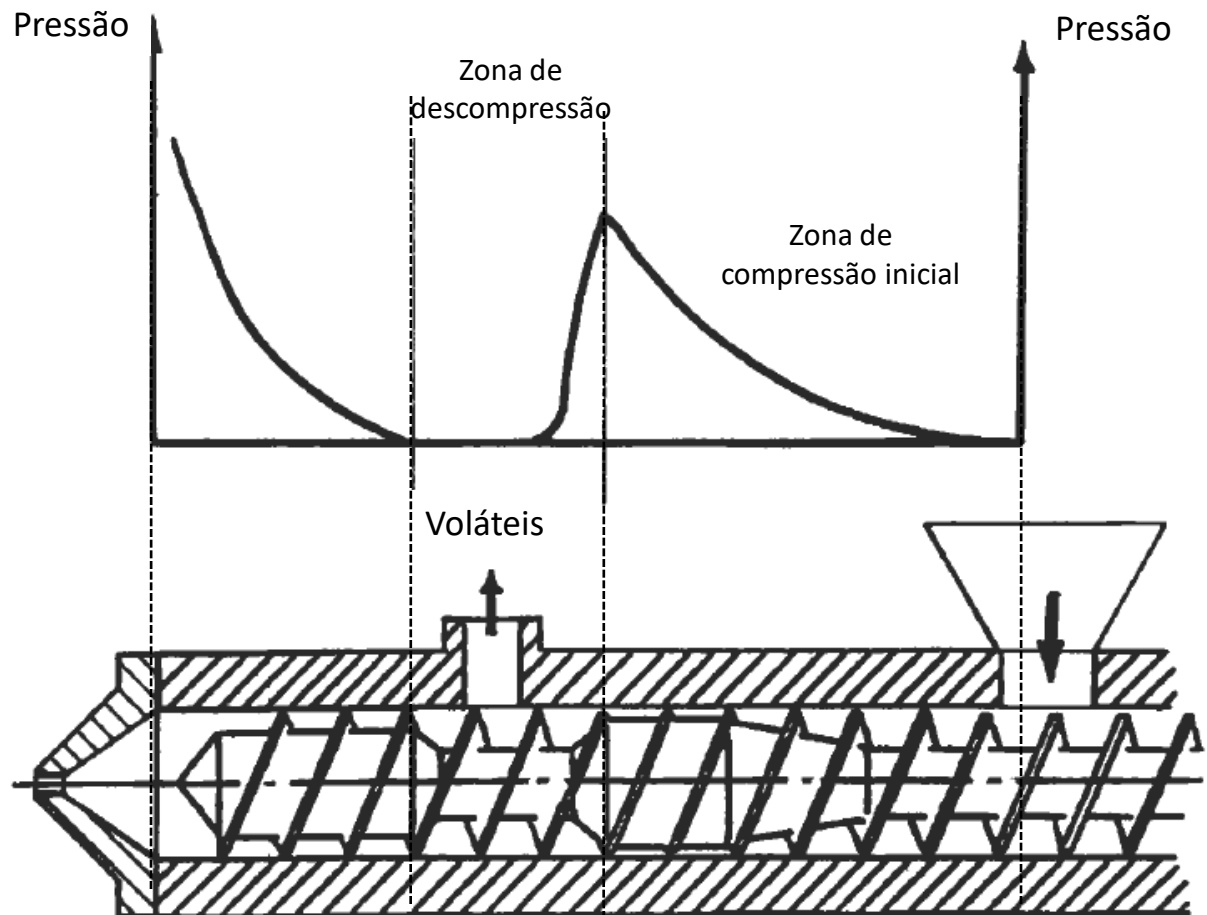
# Perfil de pressão na rosca



# Zona de Degasagem

**-Materiais higroscópicos**  
**-Pode fazer uso de vácuo**

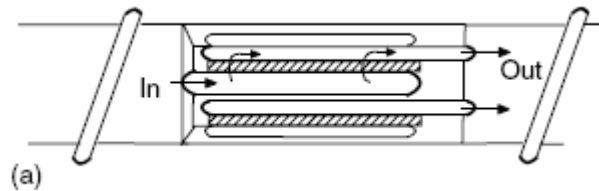
- A zona de descompressão pode ser empregada para a adição de outros materiais



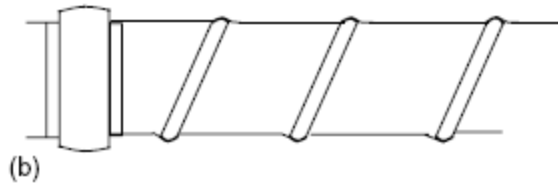
# Elementos adicionais de mistura

(alto cisalhamento)

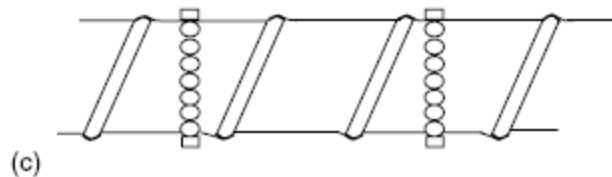
**Objetivo:** Dispersar, distribuir, homogeneizar e completar a fusão do material



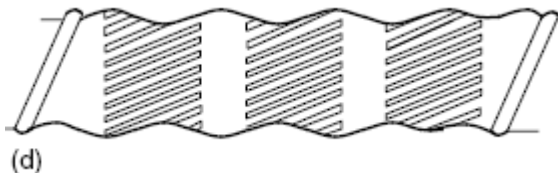
Elemento de Maddock



Elemento de anéis

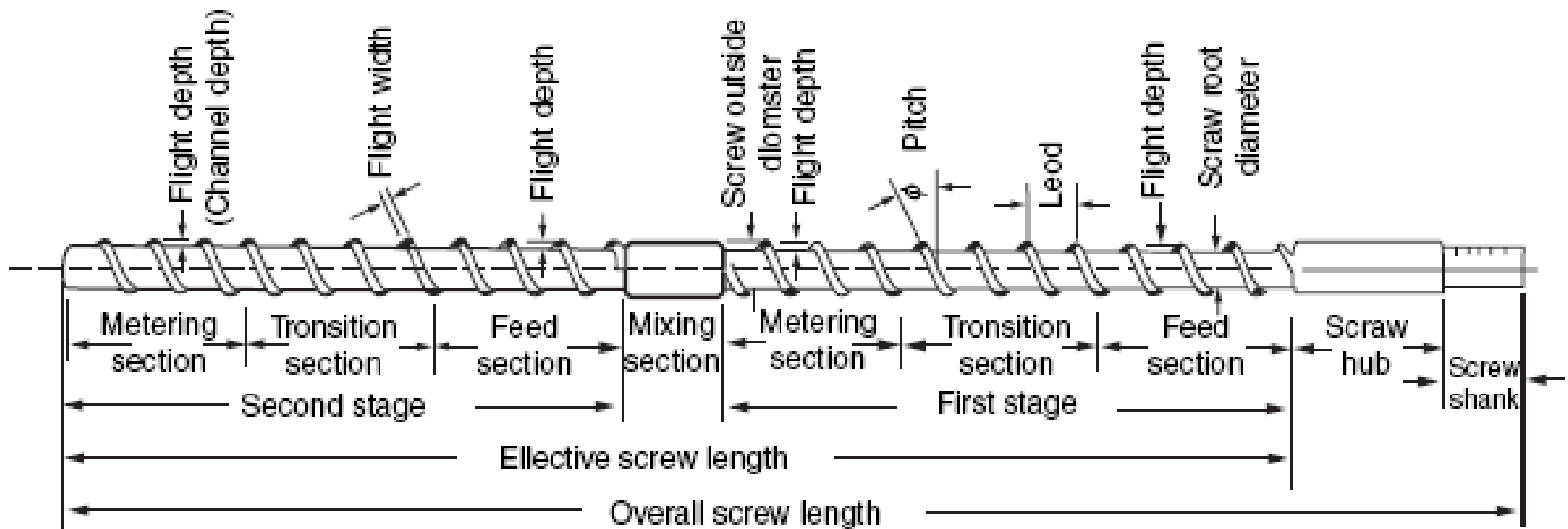


Elemento de pinos



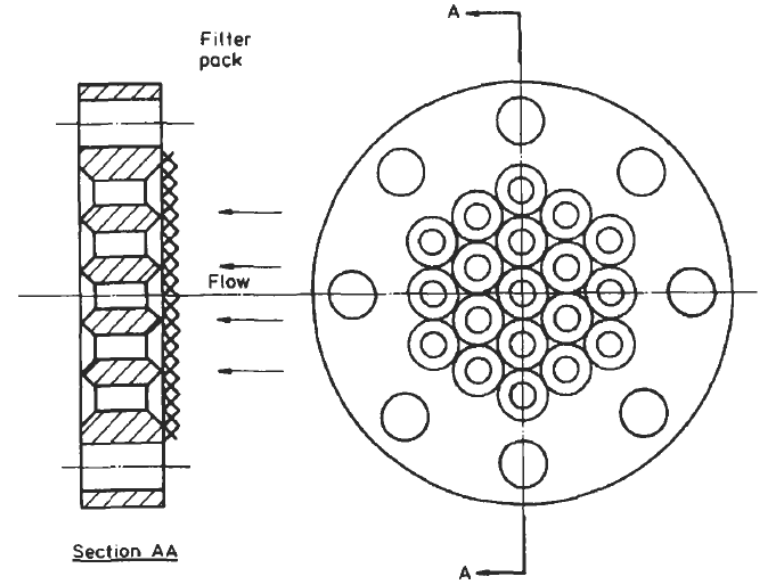
Elemento de canais interrompidos

# Roscas de duplo estágio



# Grelha e tela filtro

- Eliminar impurezas
- Aumentar a pressão de retorno melhorando a mistura



# Análise de Fluxo nas Extrusoras de Rosca Simples

Três tipos de fluxo devem ser considerados, de arraste (d), de contrapressão (p) e de escape (e).

$$Q_T = Q_d \mp Q_p \mp Q_e$$

**Arraste:** Devido ao movimento relativo entre a rosca e o barril

**Contrapressão:** Devido ao gradiente de pressão no barril

**Escape:** Ocorre entre no espaço entre o filete e o barril,  $\delta$  e é desprezível para  $\delta < 0,2$  mm.

# Análise de Fluxo nas Extrusoras de Rosca Simples

## Fluxo de Arraste, $Q_d$

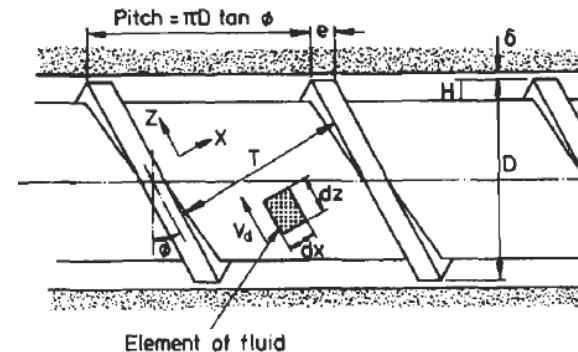
Fluxo similar ao que ocorre entre duas placas paralelas:

$$V = V_d + \left[ \frac{y}{h} \right]$$

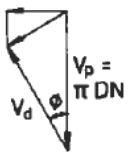
Fazendo a integração em h e T:

$$Q_d = \int_0^h \int_0^T \frac{V_d y}{h} \cdot dy dx$$

$$Q_d = \frac{1}{2} ThV_d$$



Velocidade axial



Substituindo em  $Q_d$  os elementos relacionados com a geometria da extrusora, como

$$V_d = \pi DN \cos \theta \quad \text{sendo} \quad T = (\pi D \tan \theta - e) \cos \theta$$

onde N é a velocidade da rosca em rotações por minuto,



# Análise de Fluxo nas Extrusoras de Rosca Simples

## Fluxo de Arraste, $Q_d$

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

Em geral  $e \ll \pi D \tan \theta$  (passo), e

$$Q_d = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 N h \sin \theta \cos \theta$$

# Análise de Fluxo nas Extrusoras de Rosca Simples

## Fluxo de Contrapressão, $Q_p$

$$Q_p = - \frac{\pi D h^3 \text{sen}^2 \theta}{12 \eta} \cdot \frac{dP}{dL}$$

## Fluxo de Escape, $Q_e$

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

Sendo o Fluxo **total** dado por

$$Q_T = Q_d \bar{\tau} + Q_p \bar{\tau} + Q_e$$

E assumindo que o gradiente de pressão pode ser considerado linear,

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

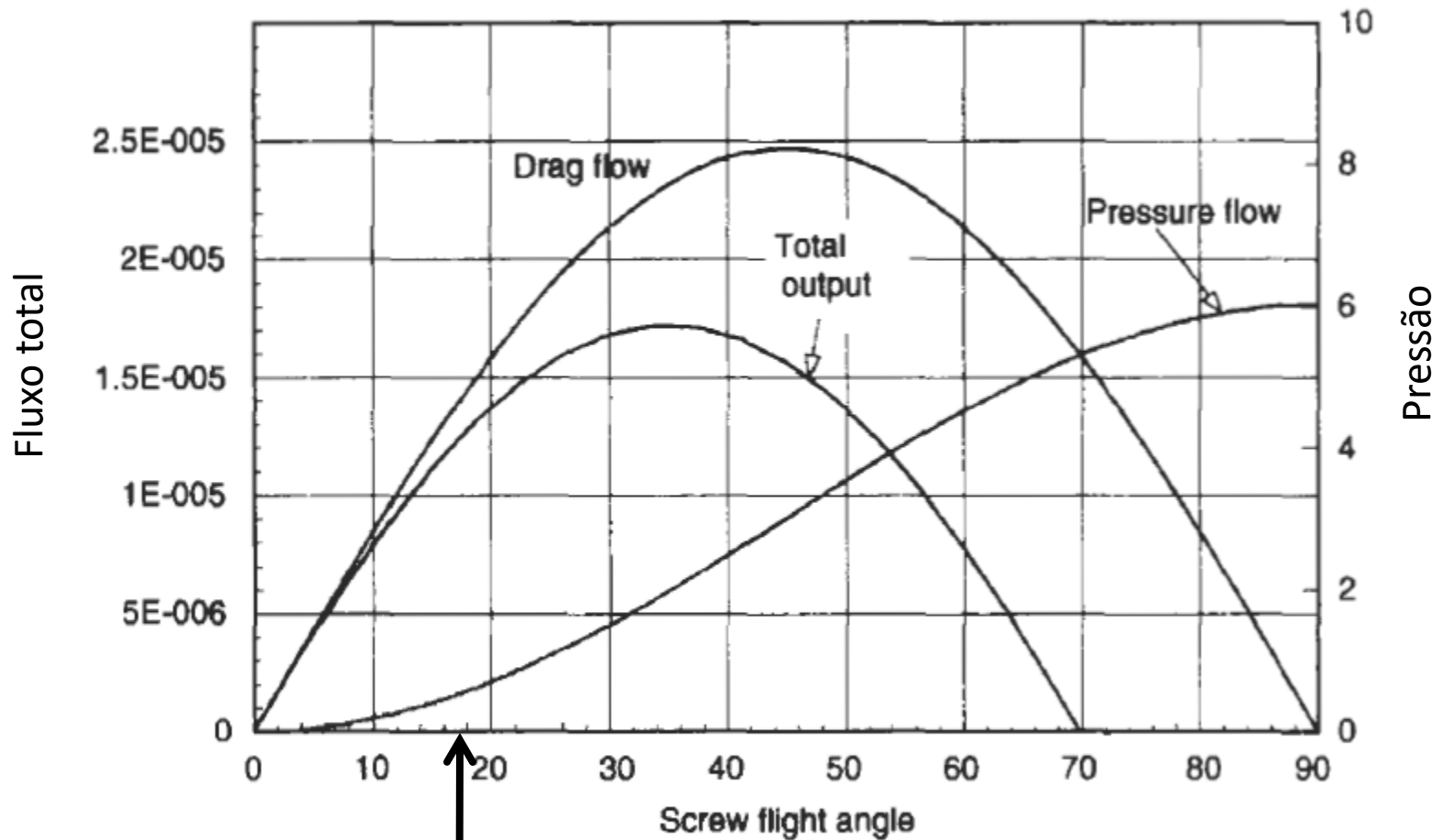
L = comprimento do barril

Considerando desprezível  $Q_e$ , teremos:

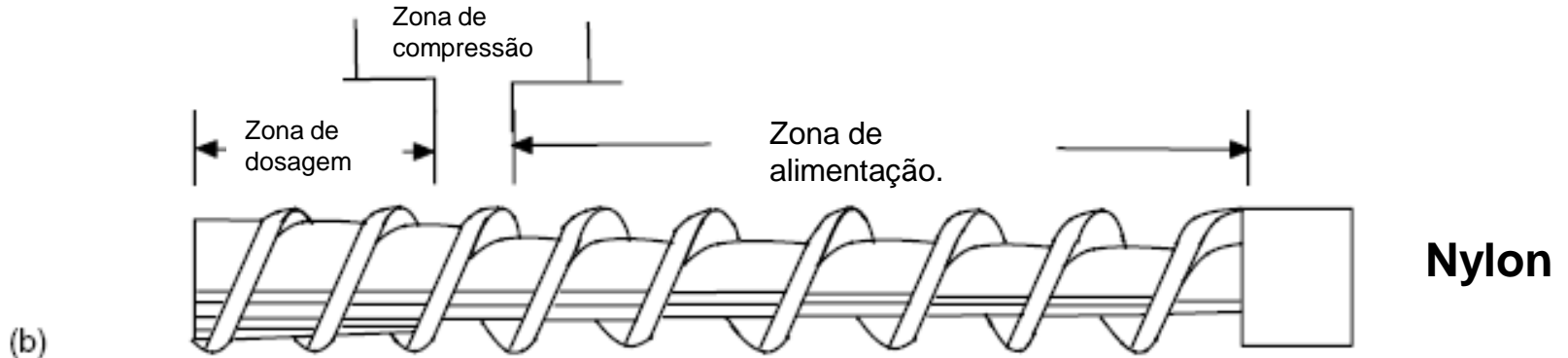
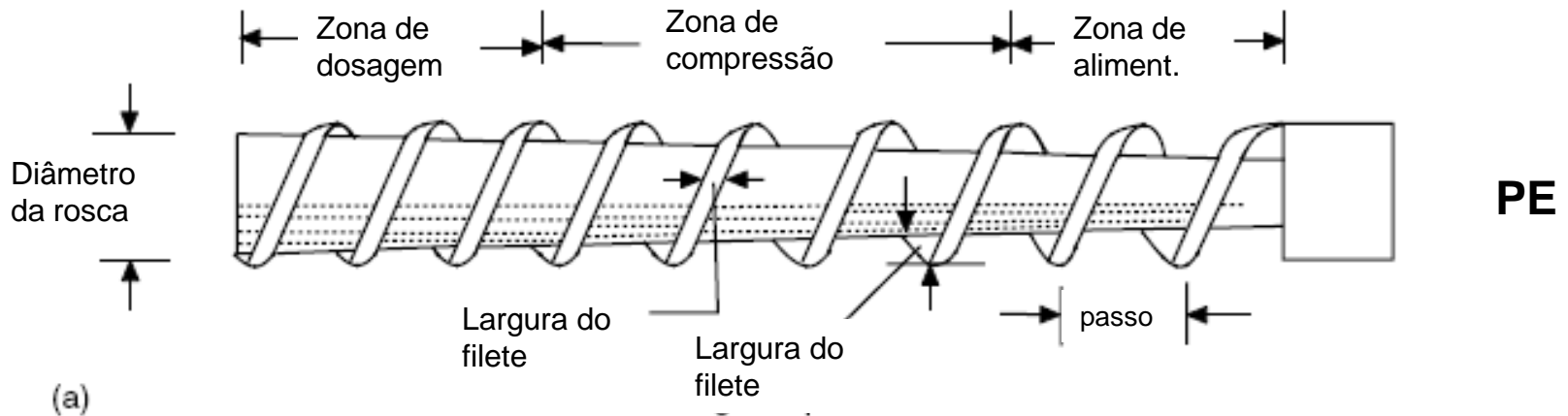
$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N h \sin \theta \cos \theta - \frac{\pi D h^3 \sin \theta}{12 \eta} \frac{P}{L}$$

Uma aproximação é  $Q_T = D(\text{cm})^{2,2}$  (kg/h)

A partir da equação do fluxo total podemos calcular qual a relação entre fluxo e ângulo de inclinação do filete:

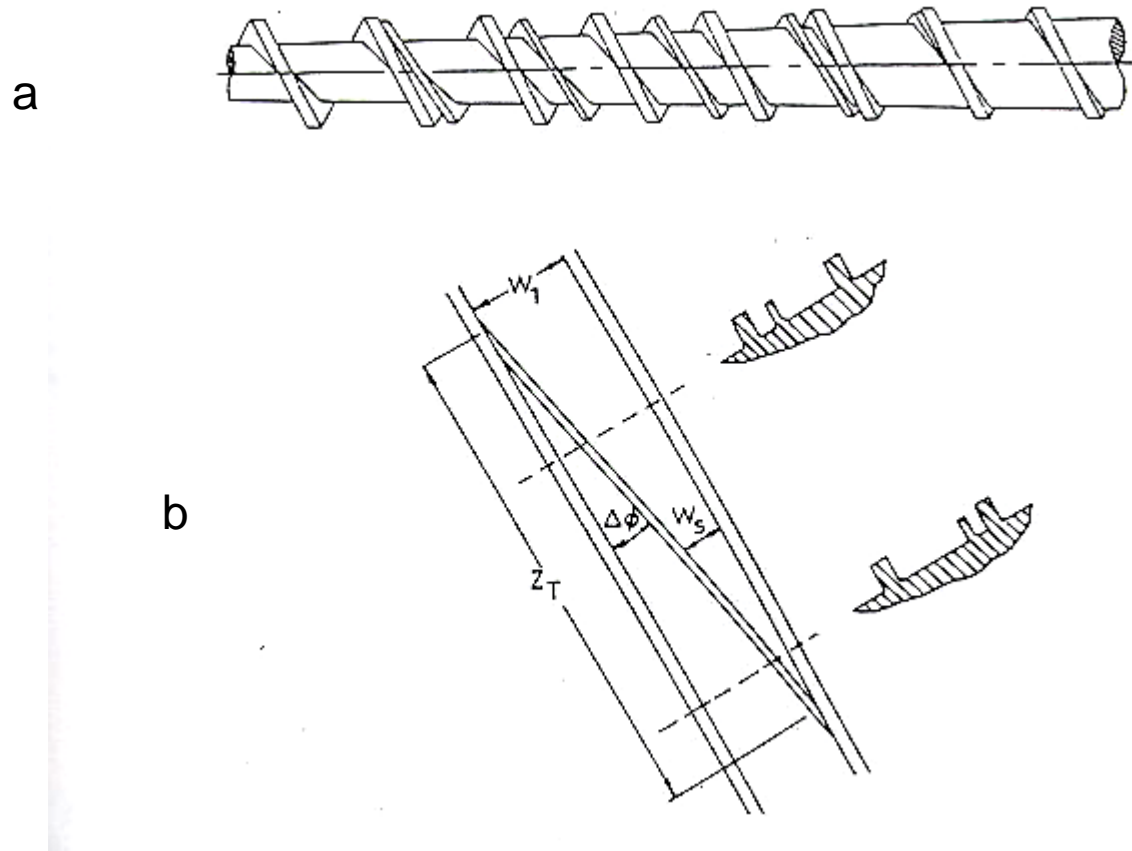


# Alguns Tipos de Roscas Simples



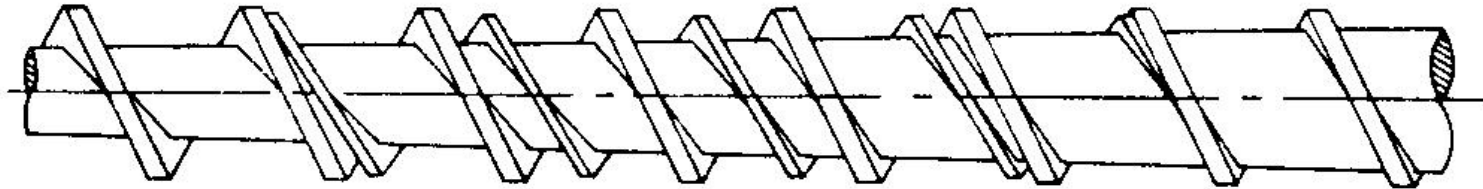
(a) Rosca com ângulo constante com redução da profundidade do canal típica para polietileno e (b) rosca com ângulo constante com redução da profundidade do canal típica para nylon.

# Alguns Tipos de Roscas Simples

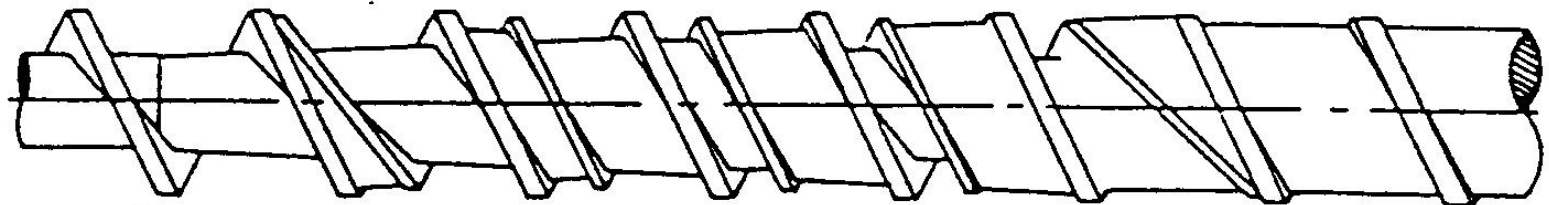


Rosca com filete divisor.

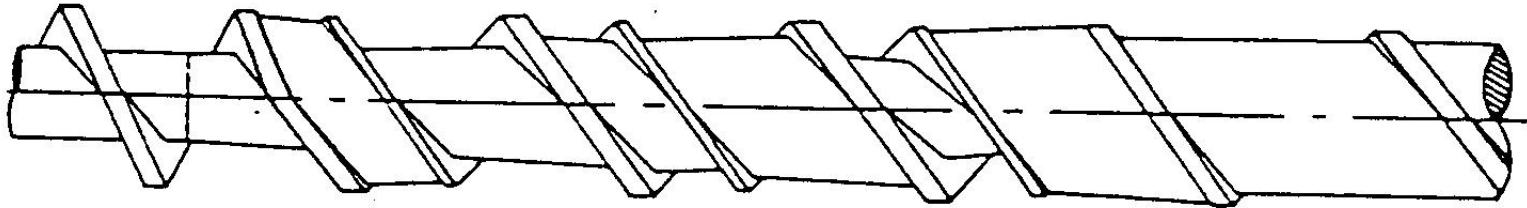
Rosca de Maillefer: Filete divisor separa o material fundido do material sólido



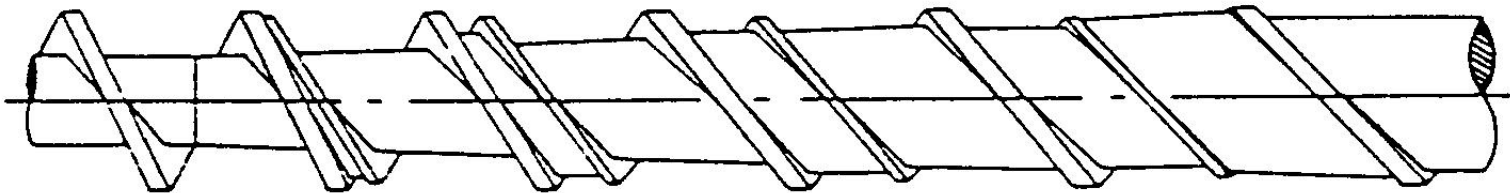
Rosca de Barr: Similar a de Maillefer porém com largura do canal do material sólido constante



Rosca de Dray e Lawrence:



Rosca de Kim





# Extrusora de Rosca Dupla

## TIPOS DE EXTRUSORAS DE ROSCA DUPLA

- ✓ CO-ROTACIONAIS (CO-ROTANTES)
- ✓ CONTRA-ROTACIONAIS (CONTRA-ROTANTES)
- ✓ INTERCALADAS (INTERMESHING)
- ✓ NÃO – INTERCALADAS (NON-INTERMESHING)

## Extrusora de Rosca Dupla

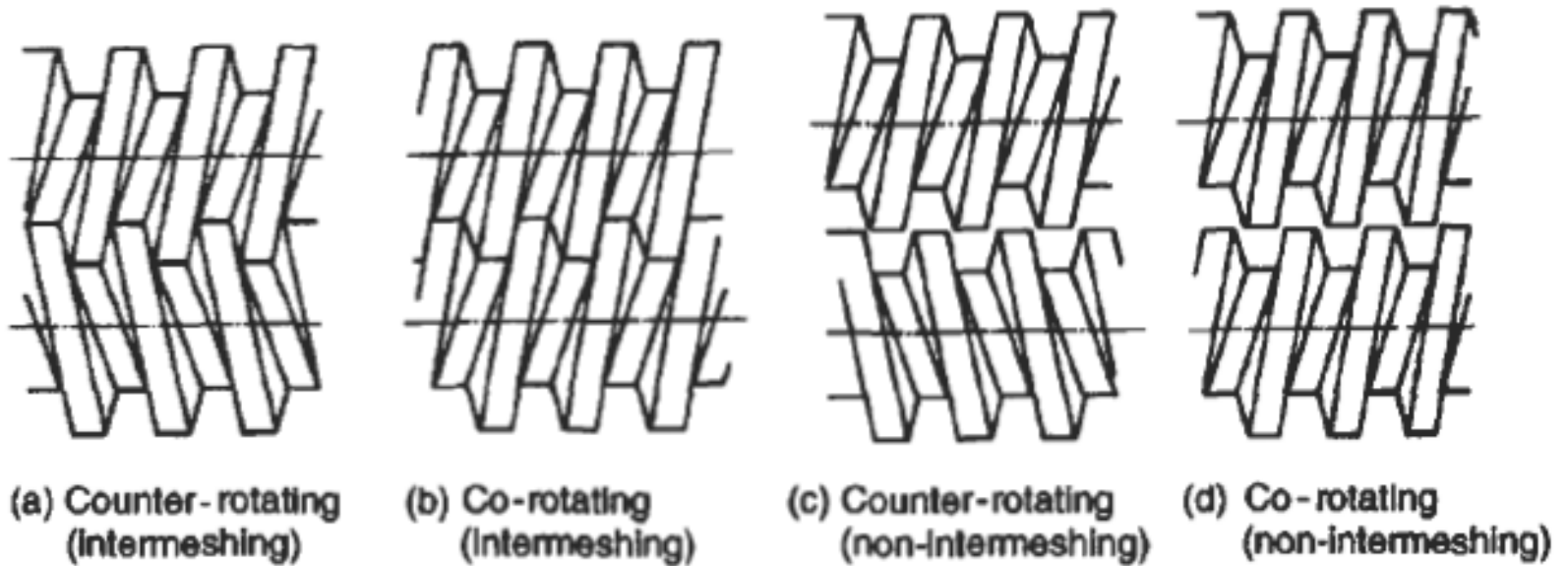
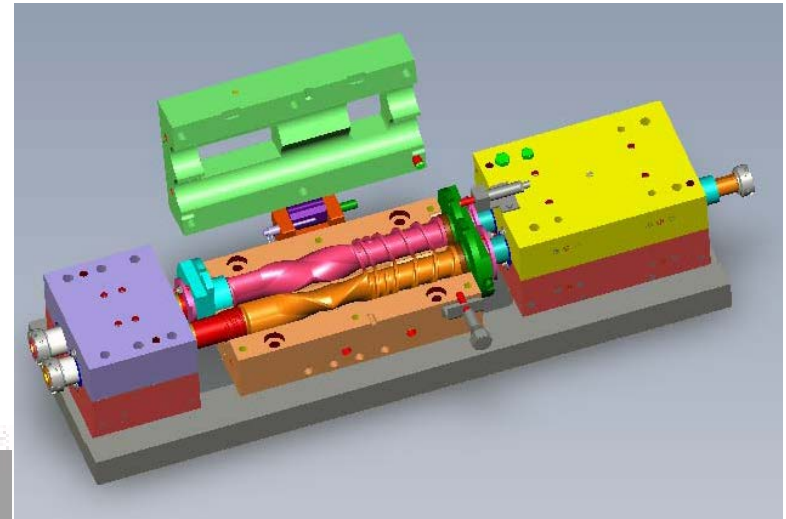
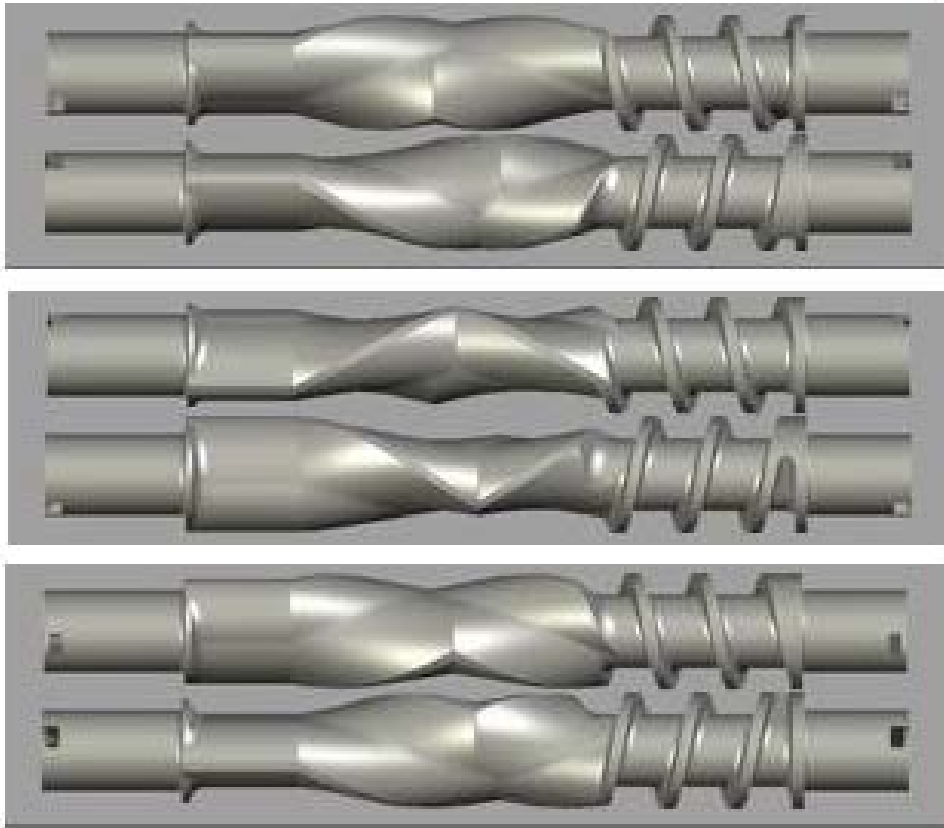


Fig. 4.14 Different types of twin screw extruder

# Misturador Farrel



Farrel Continuous Mixer (FCM™)



# **Exemplos Específicos de Processos de Extrusão**

# Extrusão de Filme Tubular

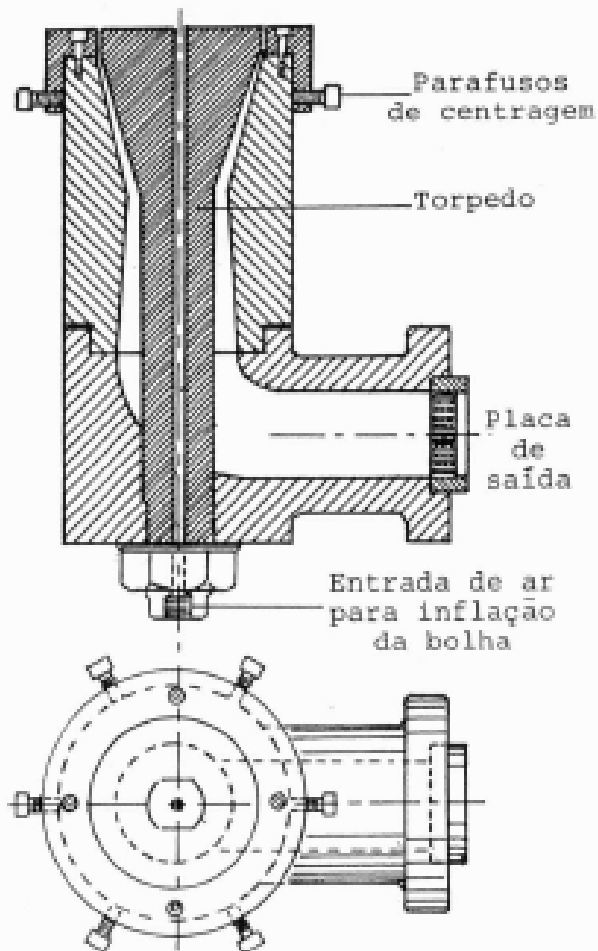


Figura 8.11 - Molde para filme tubular com alimentação lateral.

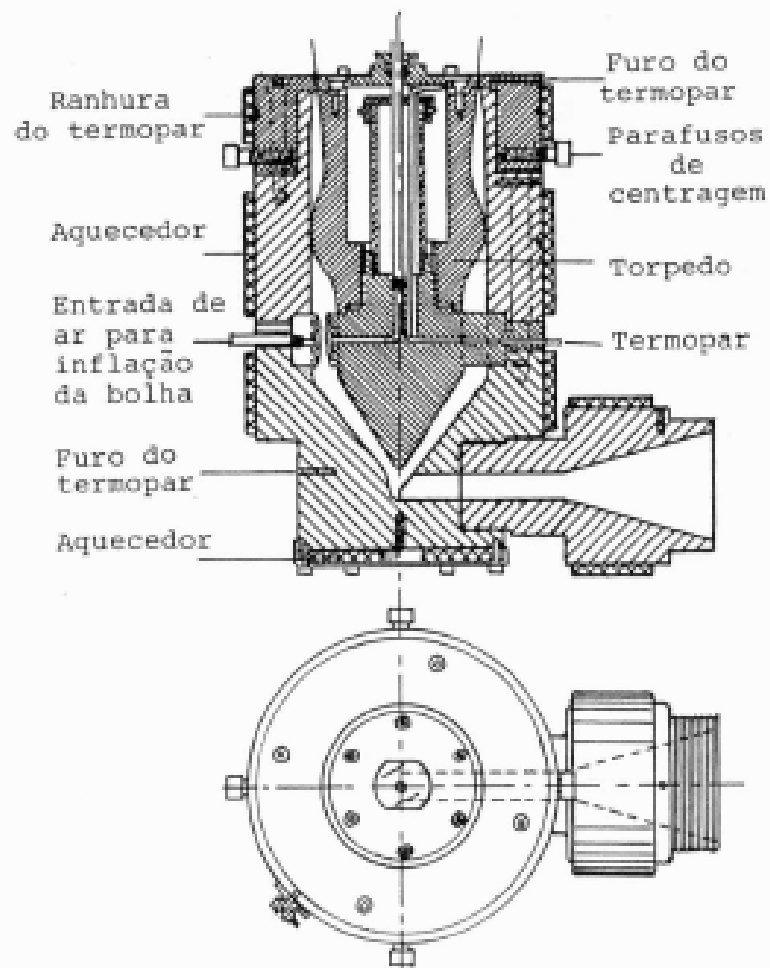
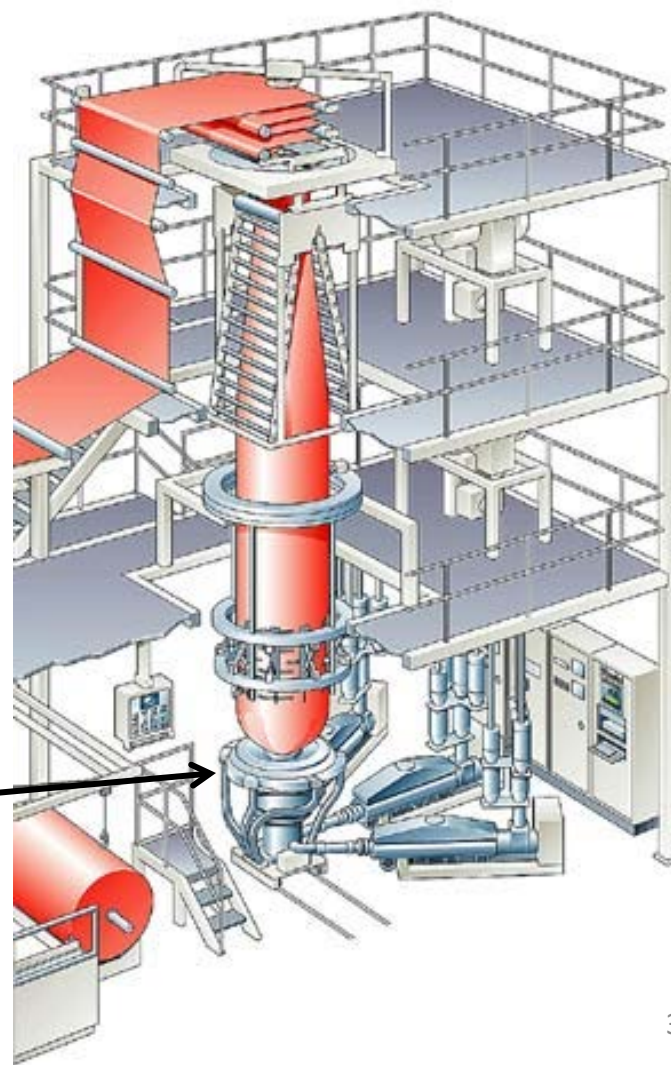
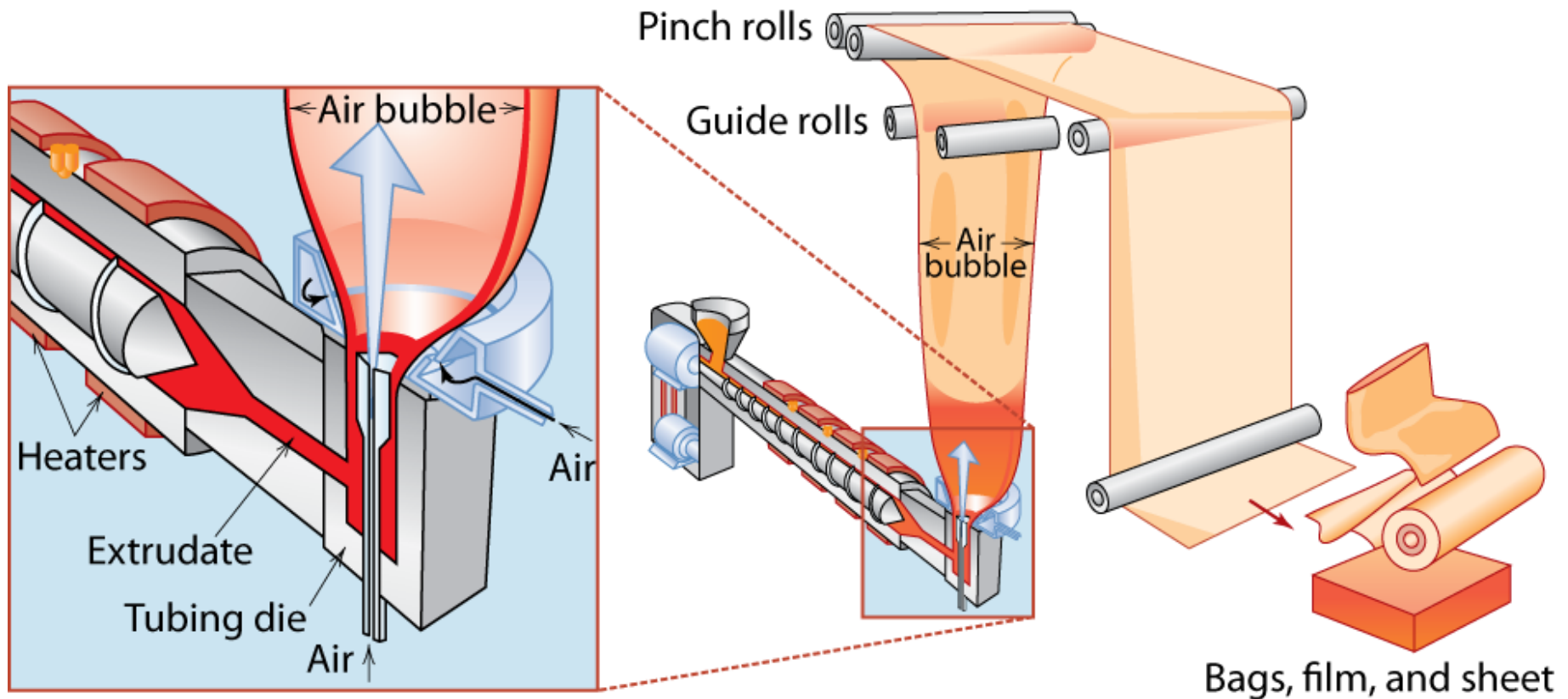


Figura 8.12 - Molde para filme tubular com alimentação inferior.

# Extrusão de Filme Tubular

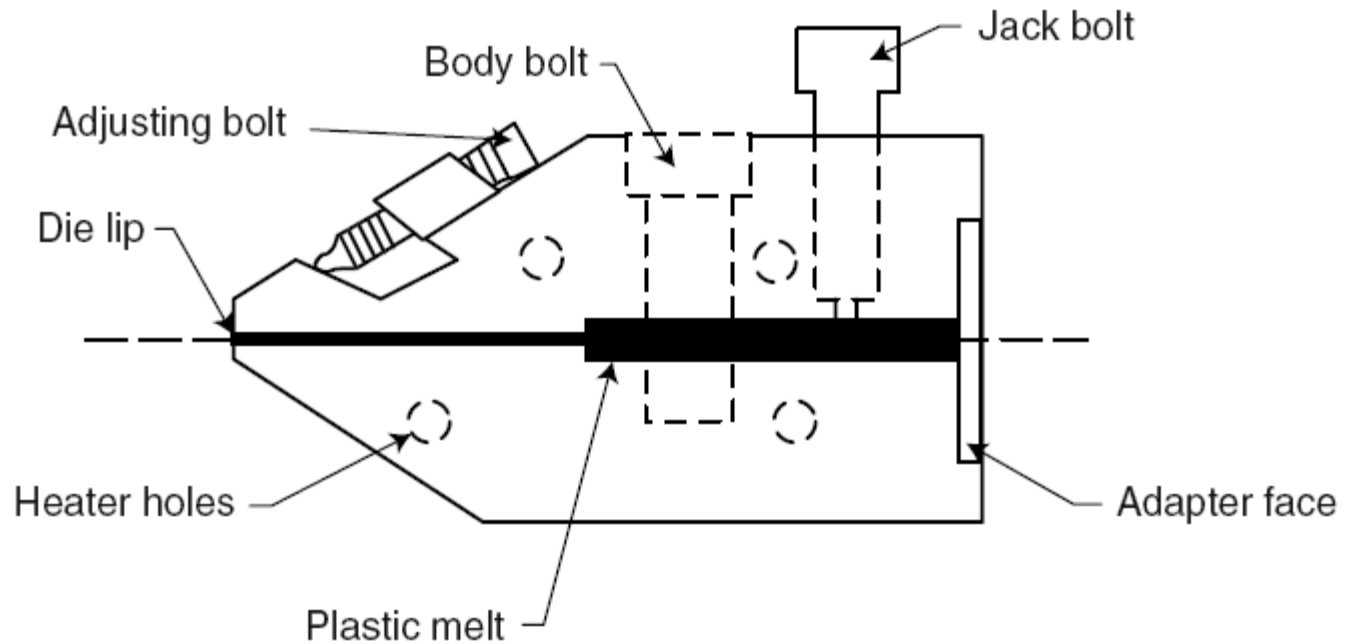


# Extrusão de filme tubular (balão ou sopro)



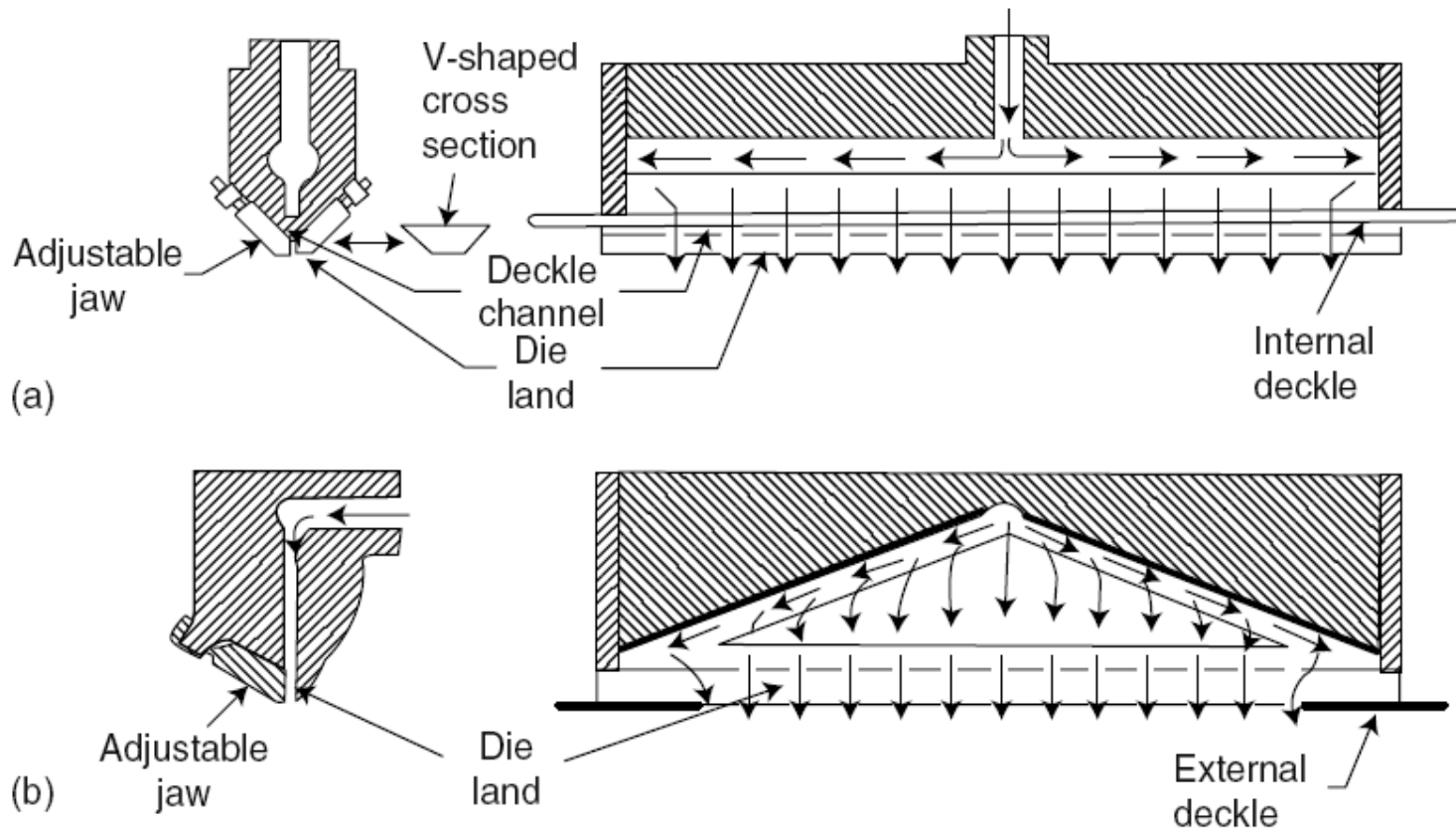
Adapted from Fig. 15.26, *Callister 7e*.  
(Fig. 15.26 is from *Encyclopædia Britannica*, 1997.)

# Extrusão de Filme Plano

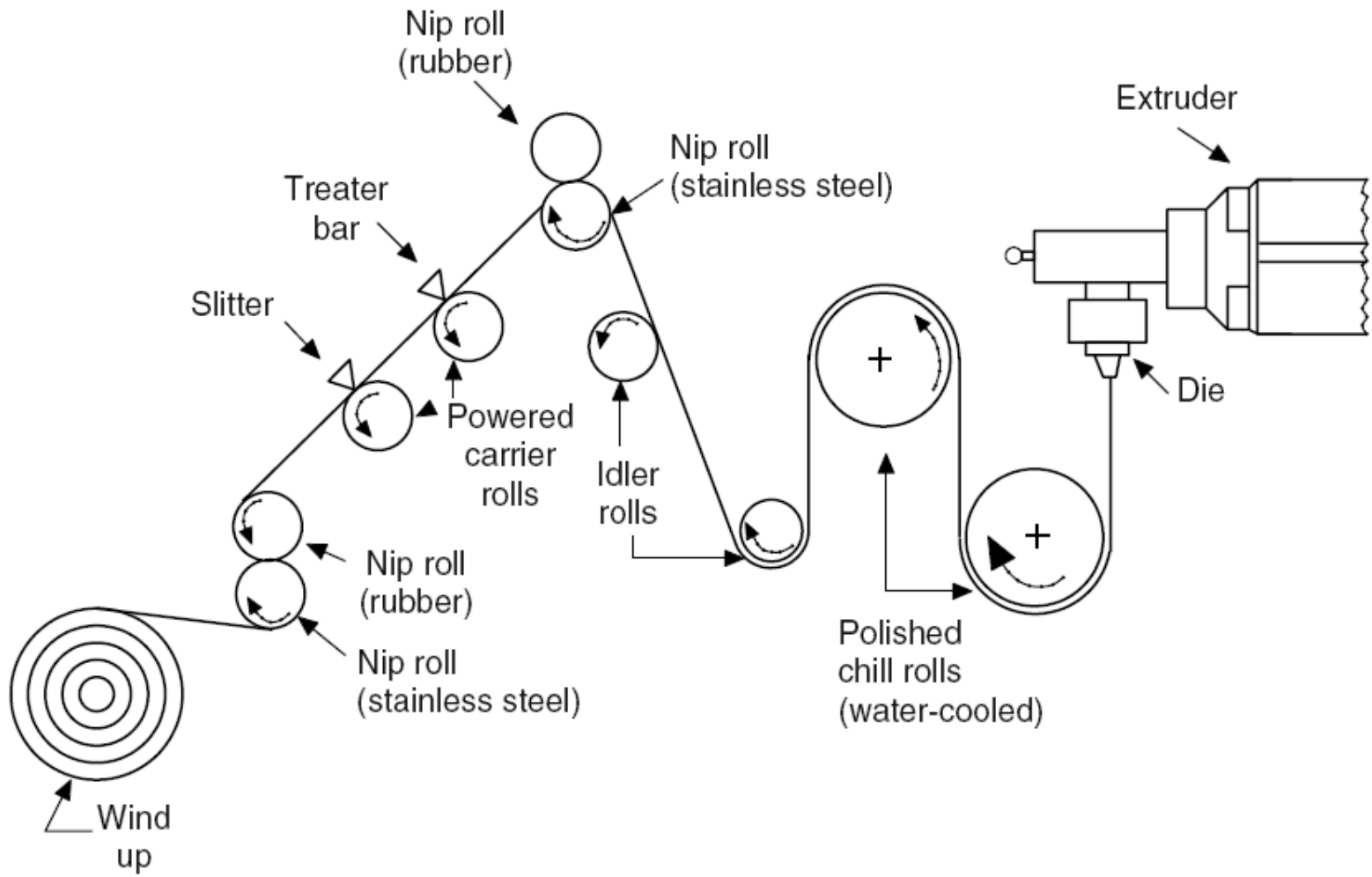


Cabeçote para extrusão de filme plano

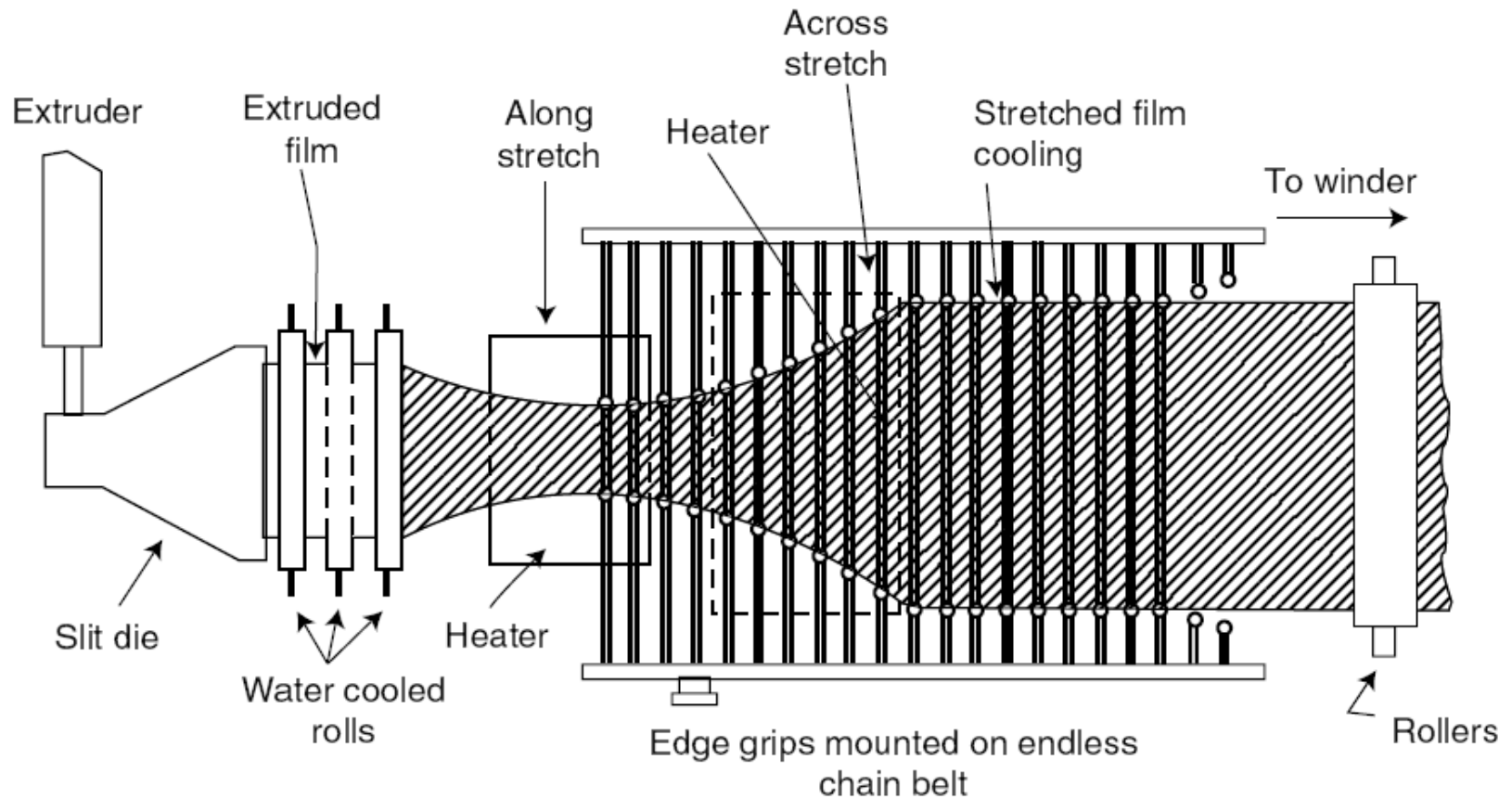




Vista esquemática de uma seção de corte de cabeçotes para extrusão de filme plano (a) distribuidor em T e (b) distribuidor em forma de cabide.

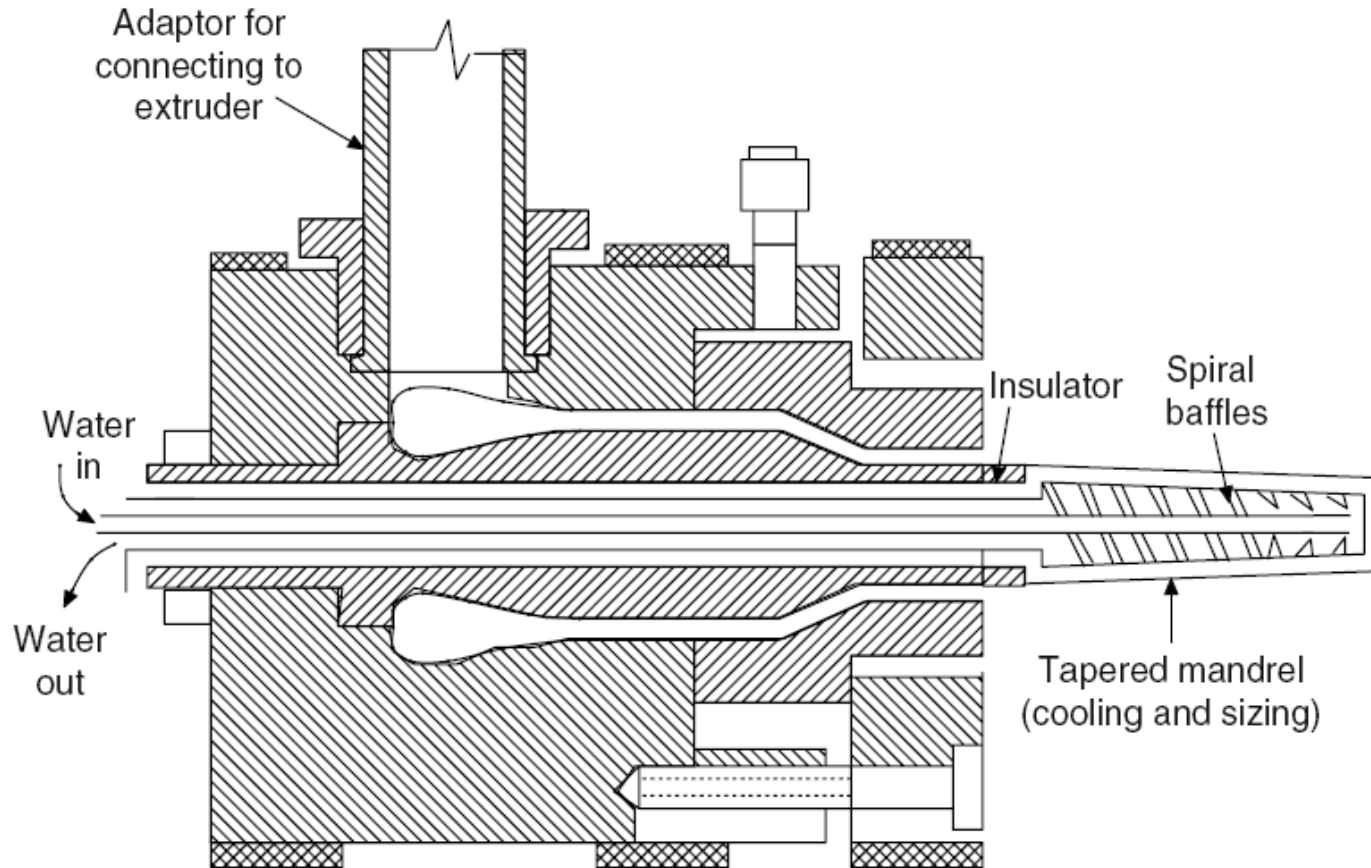


## Processo de extrusão de Filmes Biorientados



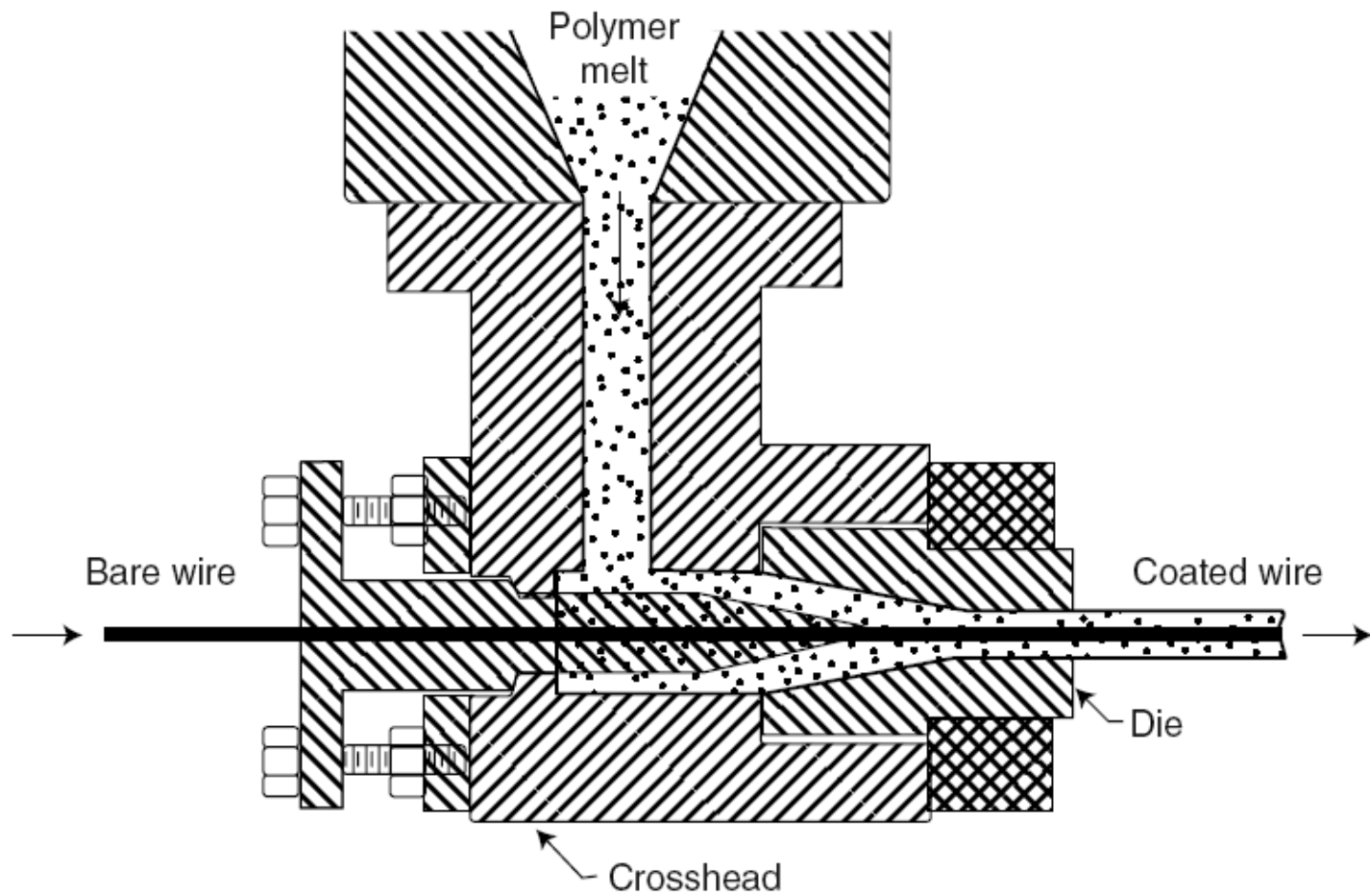
# Extrusão de Tubos, Mangueira

Extrusão de tubos e mangueiras



Cabeçote com saída refrigerada

# Recobrimentos de Fios e Cabos



## **Bibliografia**

1. D. E. Hudgin, Plastic Engineering, CRC Press, Taylor Francis Group, New York, 2007
2. R. J. Crawford. Plastics Engineerign, 3rd Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998
3. S. Manrich. Processamento de Termoplásticos, ArtLiber, São Paulo, 2005.
4. A. Blass, Processamento de Polímeros.
5. D.W Van Krevelen, Properties of Polymers, Elsevier, Amsterdam, 1992.