



SEM-0534

Processos de Fabricação Mecânica

Moldagem de Polímeros por Extrusão

Professor

Alessandro Roger Rodrigues

Moldagem por Extrusão

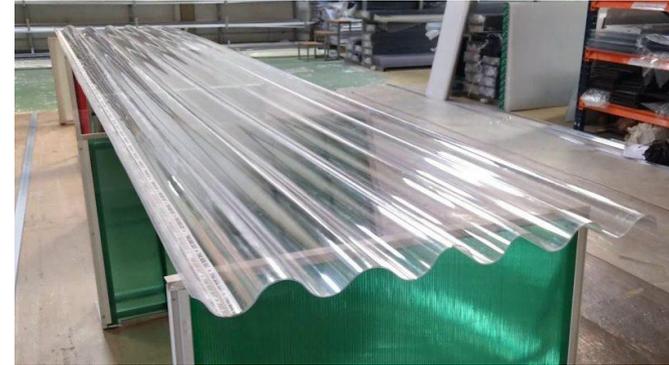


Sumário

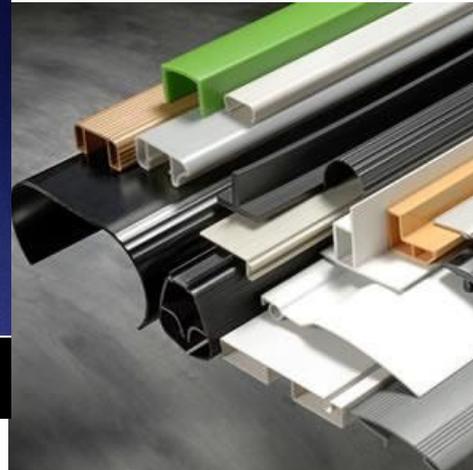
- 1) Conceitos sobre Extrusão de polímeros
- 2) Equipamento
- 3) Processo

Moldagem por Extrusão

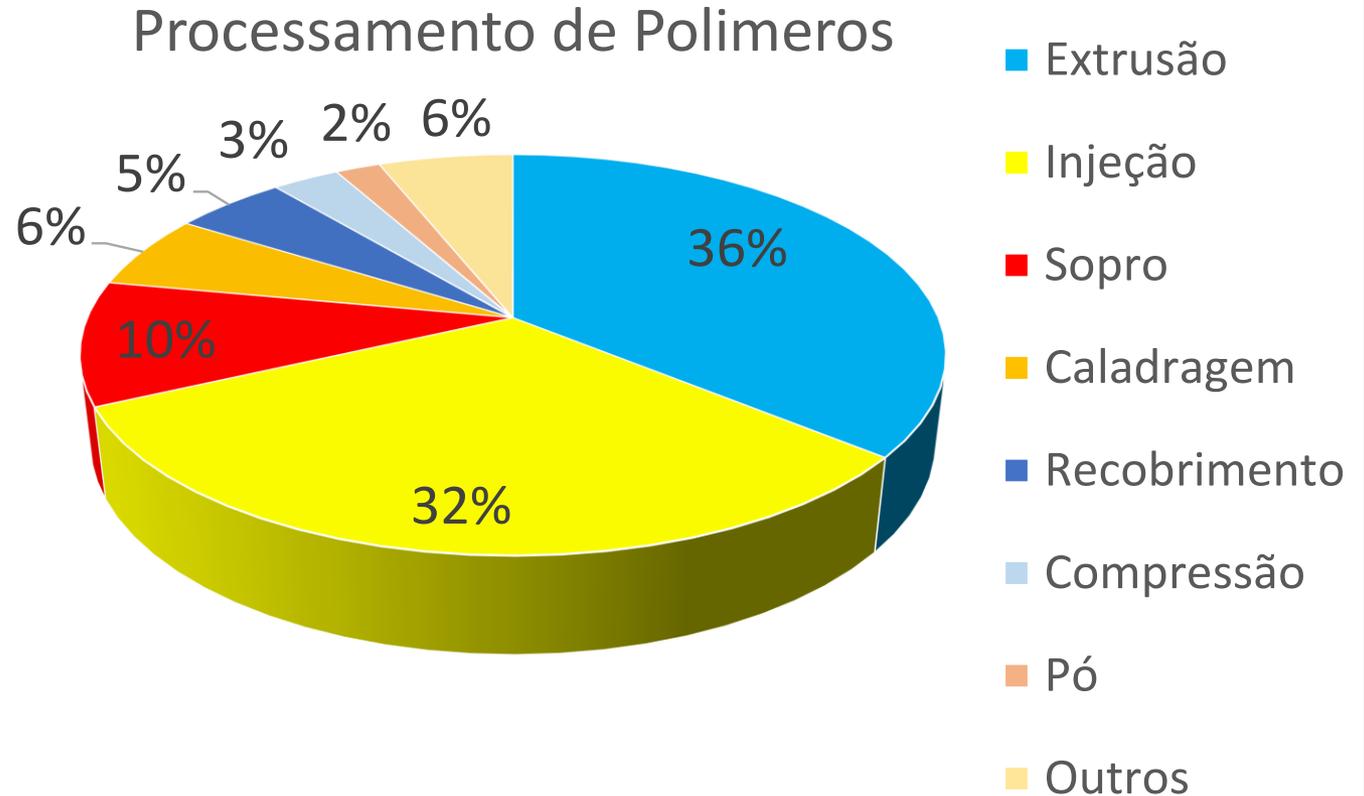
- Definição geral:
- *Extrusão: é a produção contínua de um artigo semiacabado, tubos ou filmes/folhas a partir de material polimérico (resina plástica)*

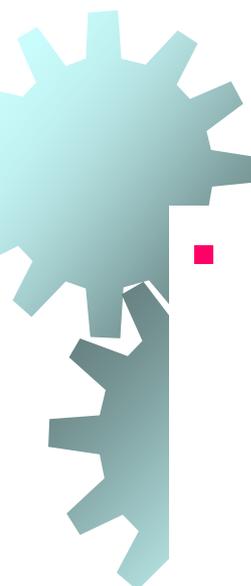


Extruded plastic samples: pipes, profiles, sheets, granules, etc.



Moldagem por Extrusão





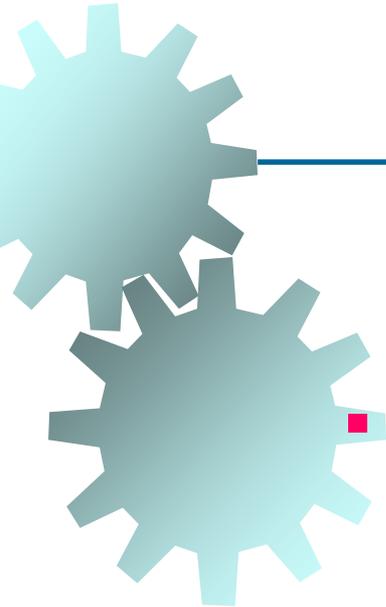
Moldagem por Extrusão

- Definição: ***Processo de compressão no qual o material é forçado a escoar através do orifício de uma matriz para formar uma peça contínua e longa cuja a forma da seção transversal é determinada pela forma do orifício.***
- Amplamente usado para termoplásticos e elastômeros para produção em massa de itens, tais como: ***tubos, canos, mangueiras, formas estruturais, filmes e folhas, fibras contínuas e encapsamento de fios elétricos***
- Realizado como processo contínuo; o extrudado é cortado em comprimentos pré determinados

Extrusão e Molde

- Extrusora

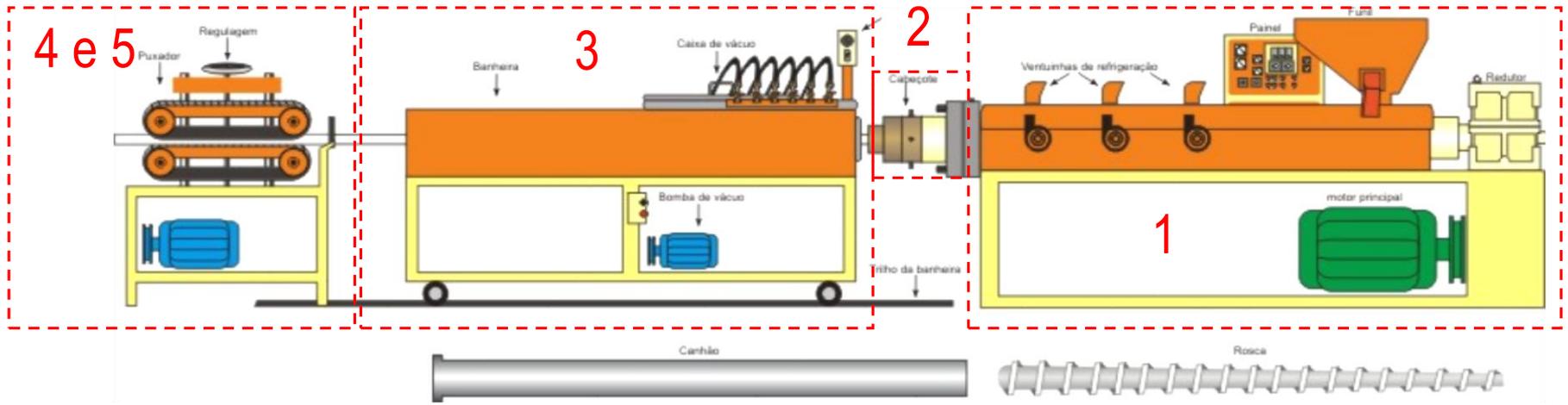
É a unidade mestre de um sistema de extrusão o qual deve suprir um fundido homogêneo ao molde na quantidade, temperatura e pressão necessária.



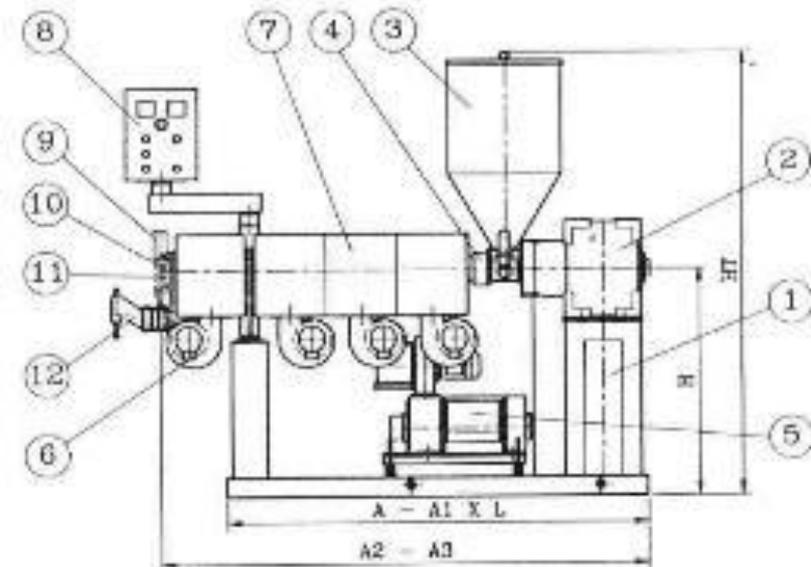
Moldagem por Extrusão

- **Sistema de extrusão** é composto por:

- 1) Extrusora,
- 2) Molde/matriz,
- 3) Equipamento de calibração/ resfriamento
- 4) Puxador
- 5) Equipamento de corte.



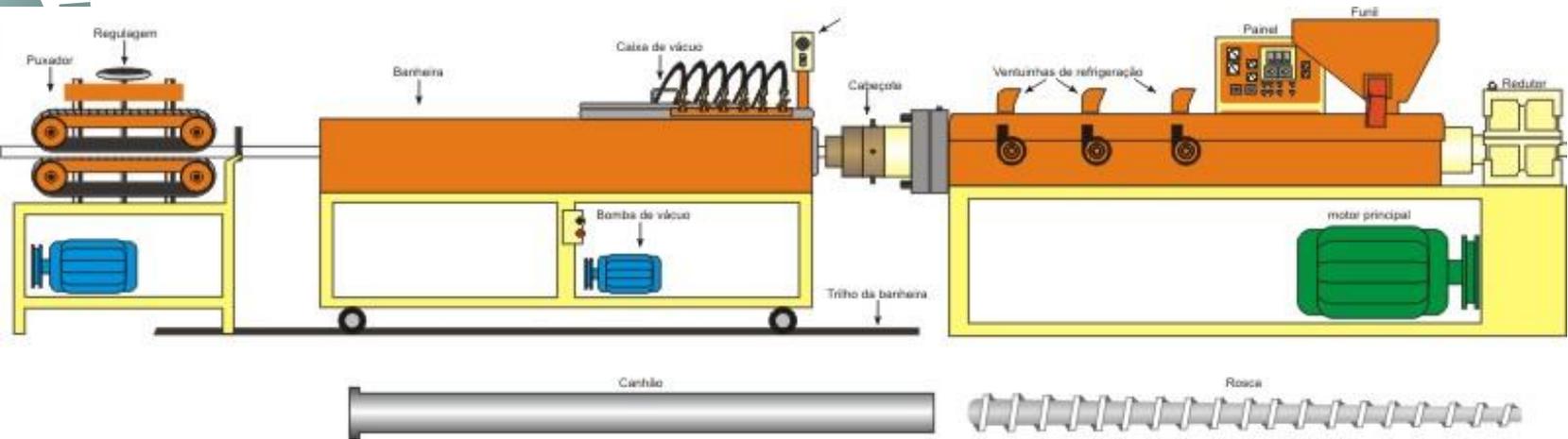
Partes da Extrusora



- 1 - Base
- 2 - Redutor
- 3 - Funil
- 4 - Resfriamento na Alimentação
- 5 - Motor
- 6 - Ventiladores para Resfriamento

- 7 - Proteção das Residências
- 8 - Painel de Comando
- 9 - Fecho Bi - Partido para cabeçote
- 10 - Cilindro
- 11 - Rosca
- 12 - Suporte para Cabeçote

Partes da Extrusora



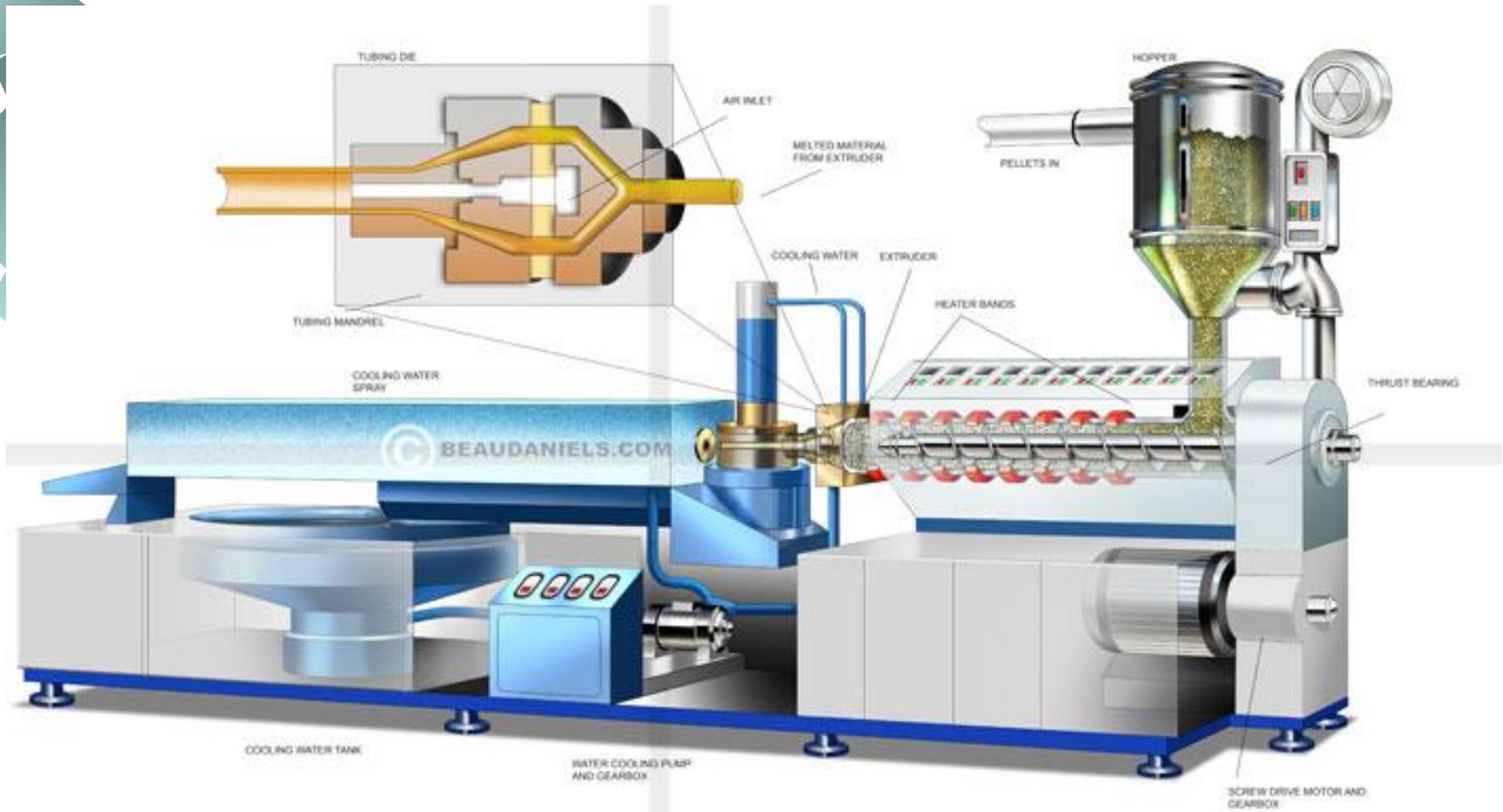
Exemplos de Extrusoras: Sacos Plásticos



lessa máquinas



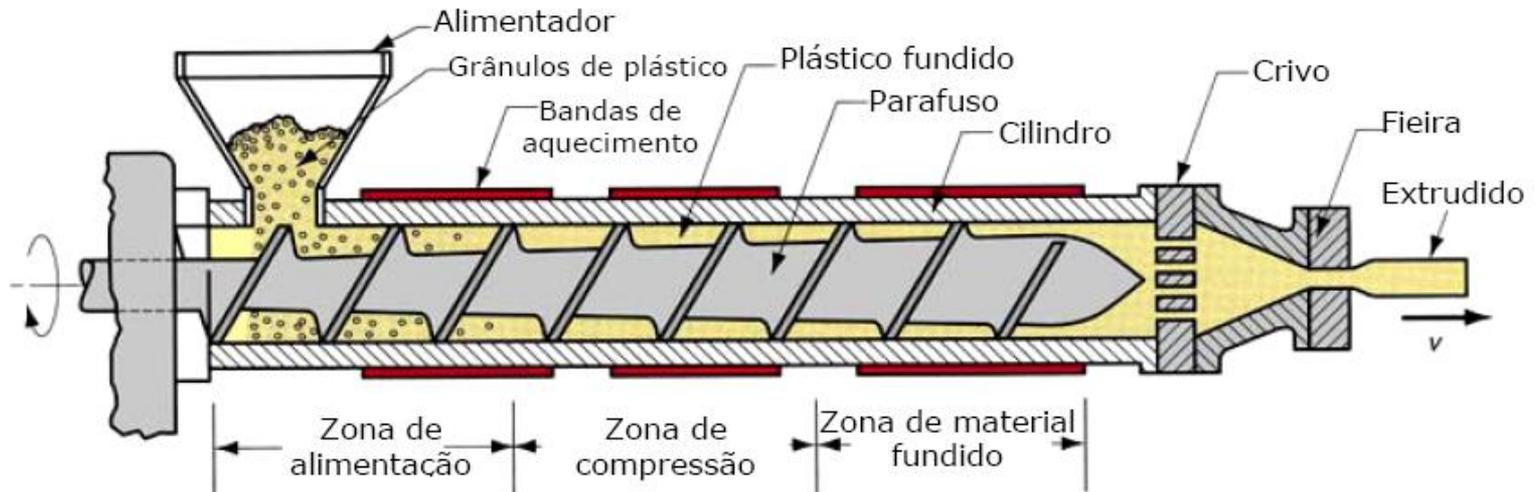
Exemplos de Extrusoras: mangueiras



PLASTIC EXTRUSION MOLDING MACHINE

Cilindro da extrusora

- Diâmetro interno na faixa de 25 a 150 mm (1,0 a 6,0 pol.)
- Razão L/D geralmente em torno de 10 e 30: razão mais alta para termoplásticos, mais baixa para elastômeros.
- Alimentação feita por gravidade para o interior da rosca cuja rotação transporta o material através do cilindro
- Aquecedores elétricos fundem a massa polimérica; misturam e trabalho mecânico adiciona calor o qual mantém o fundido



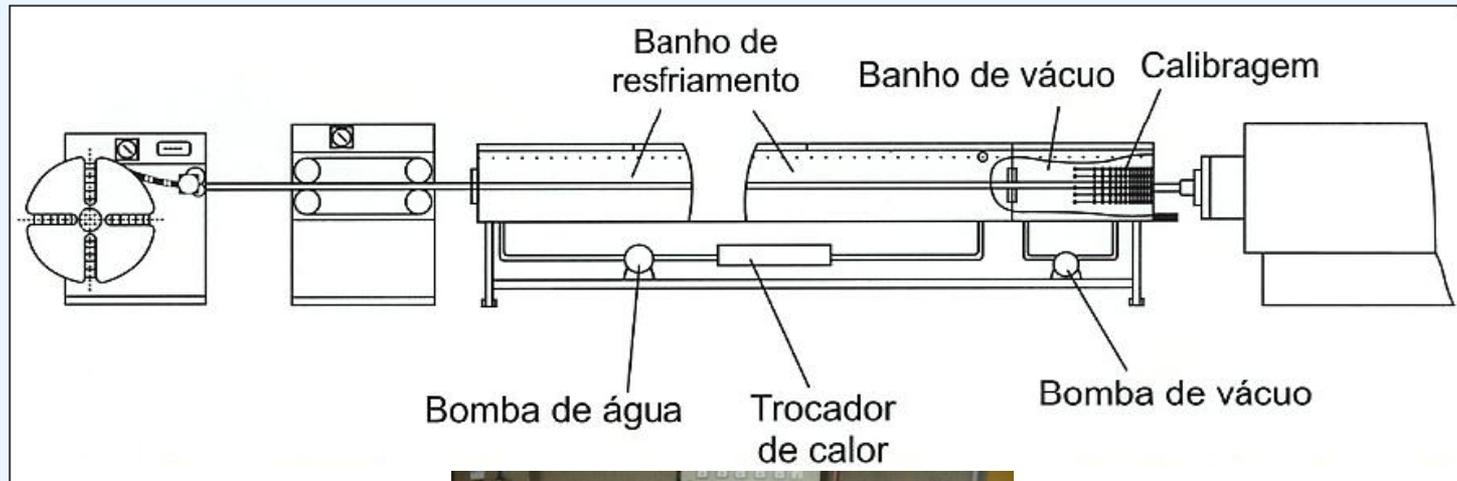
Extrusão e Molde



Extrusão e Molde

■ Resfriamento

- A banheira de resfriamento deve estar localizada próxima ao cabeçote.
- Comprimento mínimo da banheira de resfriamento: 6 metros.

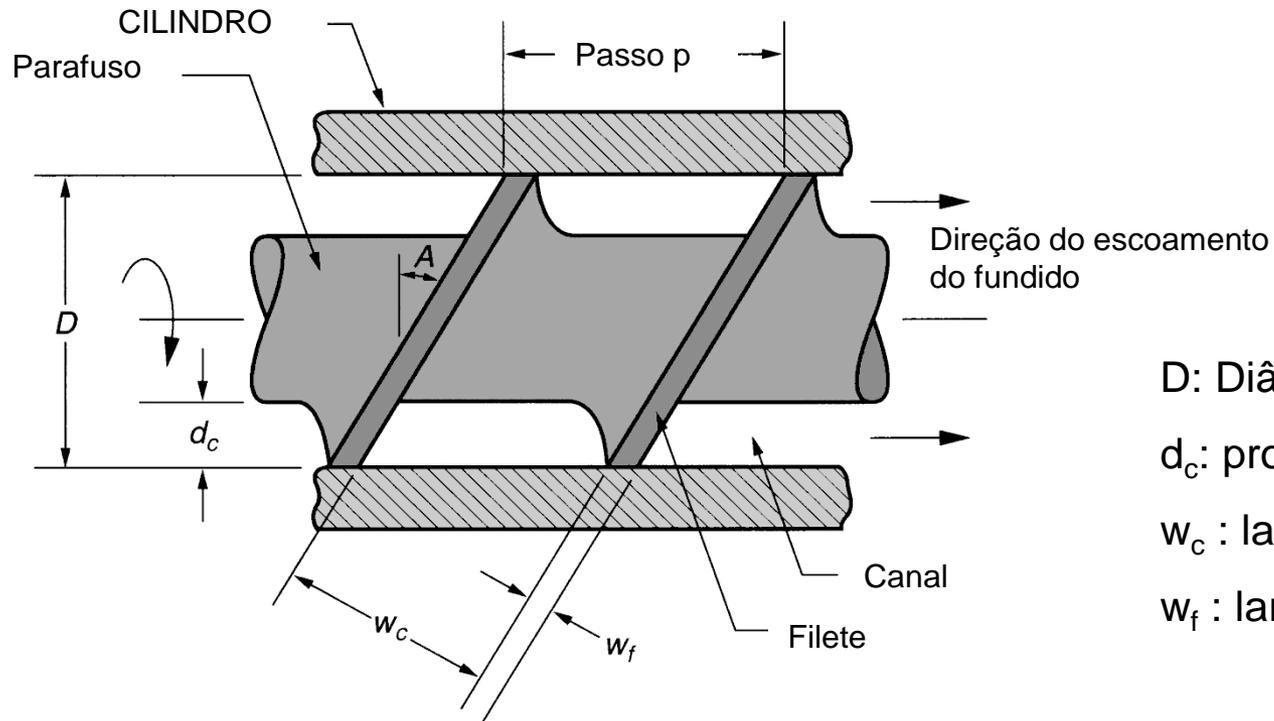


Parafusos



Detalhes do Parafuso da extrusora

Parafuso



D : Diâmetro do cilindro

d_c : profundidade do canal

w_c : largura do canal

w_f : largura do filete

Detalhes do parafuso da extrusora no interior do cilindro



Parafusos

Zona de alimentação: recebe os *pellets* do funil (por gravidade) e os transporta

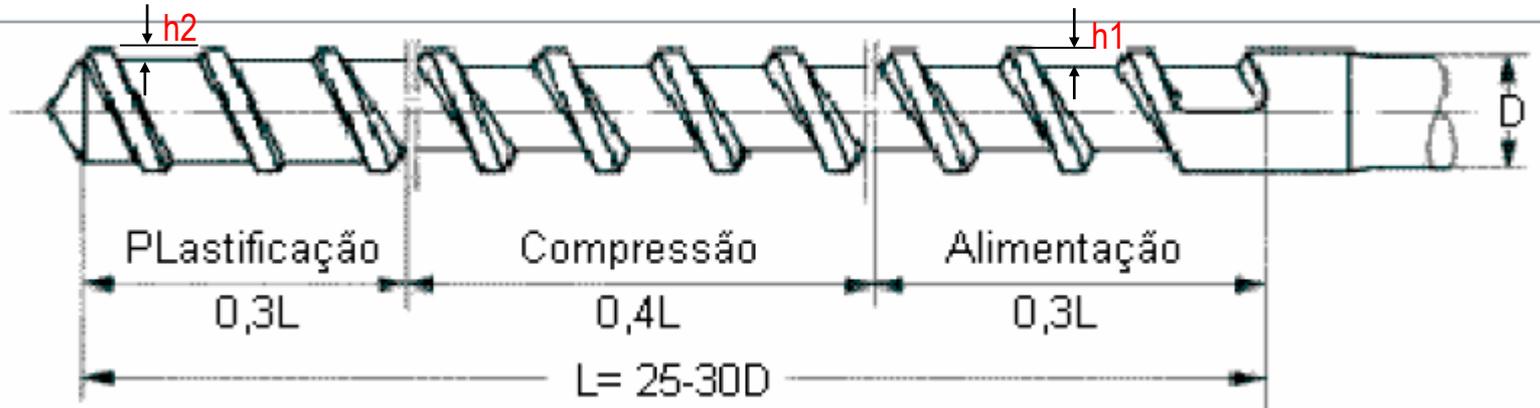
Zona de compressão: comprime o material transportado da zona de alimentação e o plastifica

Zona de dosagem: aqui ocorre a homogeneização do fundido e a elevação da temperatura até o ponto desejado.

Em extrusoras convencionais, a pressão é desenvolvida nessa seção da rosca ao mesmo tempo. Ela também determina a saída (“output”) em tais sistemas de extrusão.

Parafusos

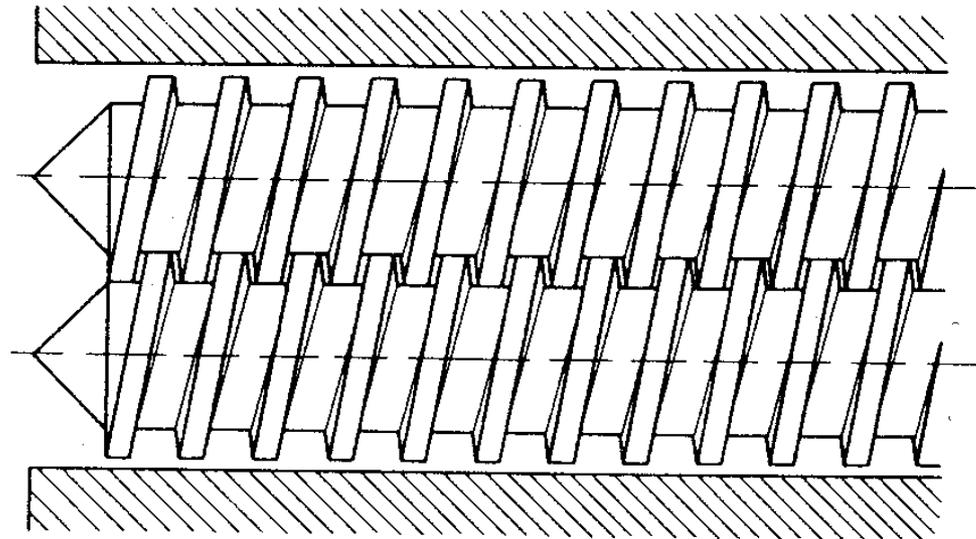
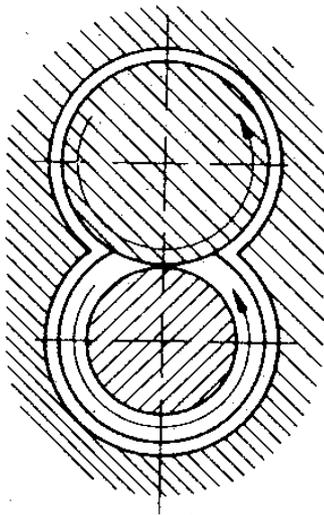
- Pode-se classificar os parafusos através da razão de compressão, a qual é definido como razão entre a profundidade do canal na zona de dosagem (h_2) em relação ao da profundidade da zona de alimentação (h_1).



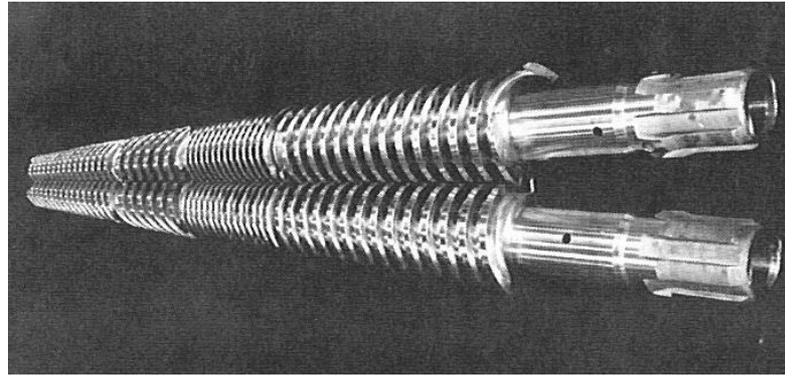
- Para garantir o preenchimento do parafuso, a razão de compressão deve corresponder a pelo menos à razão entre a densidade do substrato na zona de alimentação em relação a densidade do fundido na zona de dosagem.
- O Parafuso de dois estágios (liberação de gases): zona de descompressão para liberação de gases e retenção da resina

Configuração de Parafusos

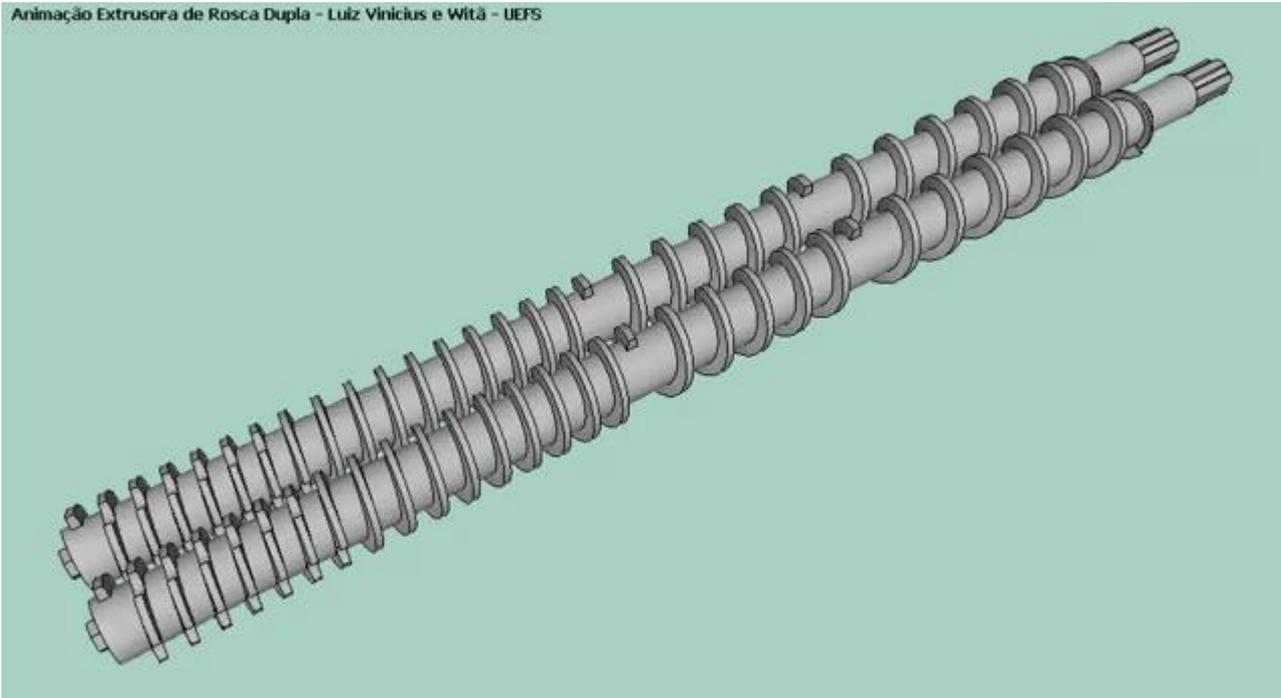
- Co-rotativas:
 - Maior cisalhamento
 - Forças de arraste similar às encontradas nas extrusoras com monorosca



Parafusos



Animação Extrusora de Rosca Dupla - Luiz Vinicius e Witã - UEFS

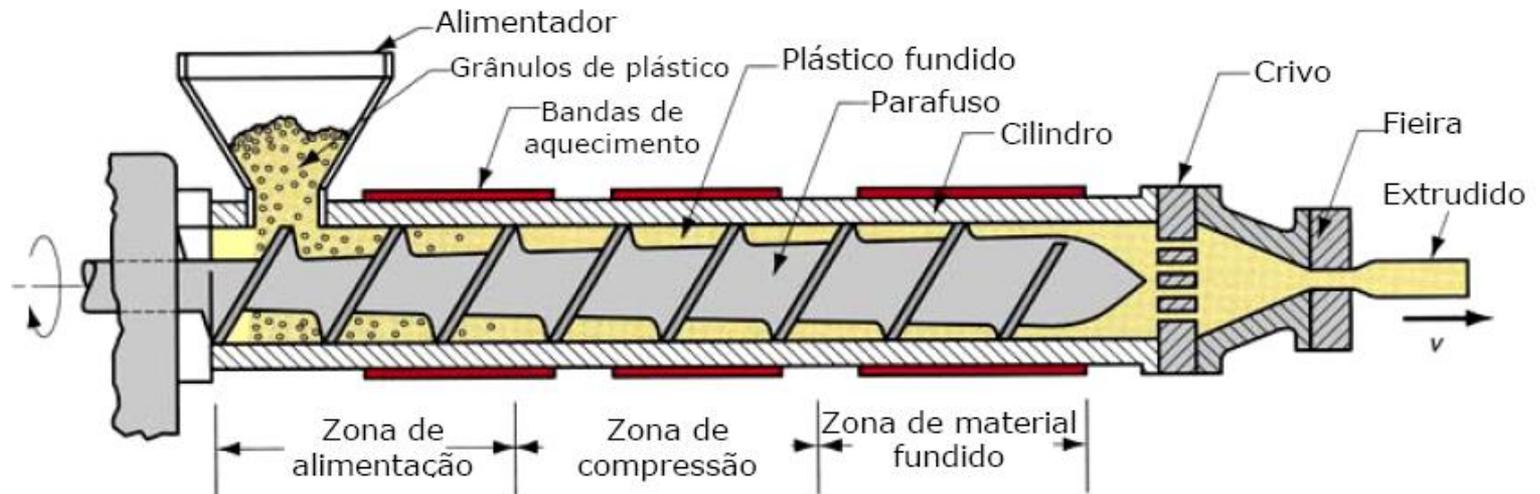


Condições de trabalho

■ Perfil de Temperaturas (°C)

Dureza Shore	Rosca				Cabeçote		Matriz
	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	zona 5	zona 6	zona 7
60A - 80A	130	145	150	160	140	150	130
	140	160	170	180	180	185	170
85A - 95A	150	160	170	180	180	175	170
	170	180	185	200	200	205	200

■ RPM rosca: 15 a 60



Extrusão - Expansão na matriz

- Polímero extrudado “recupera” sua forma inicial em uma seção transversal maior da extrusora, tenta retornar a ela após deixar o orifício da matriz

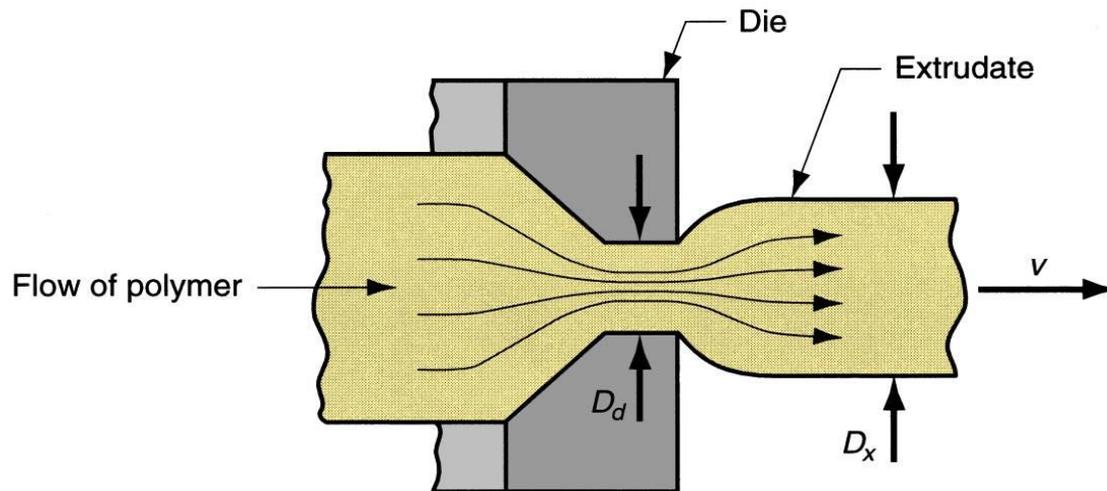
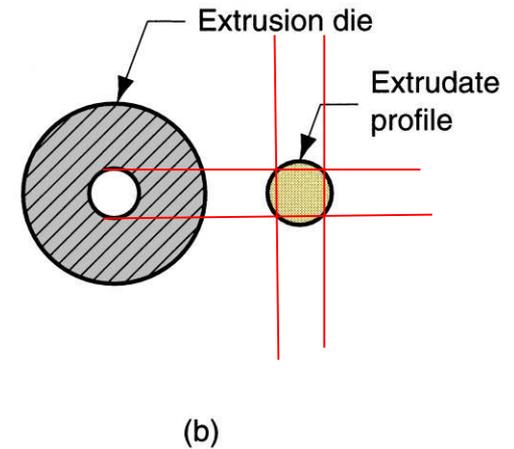
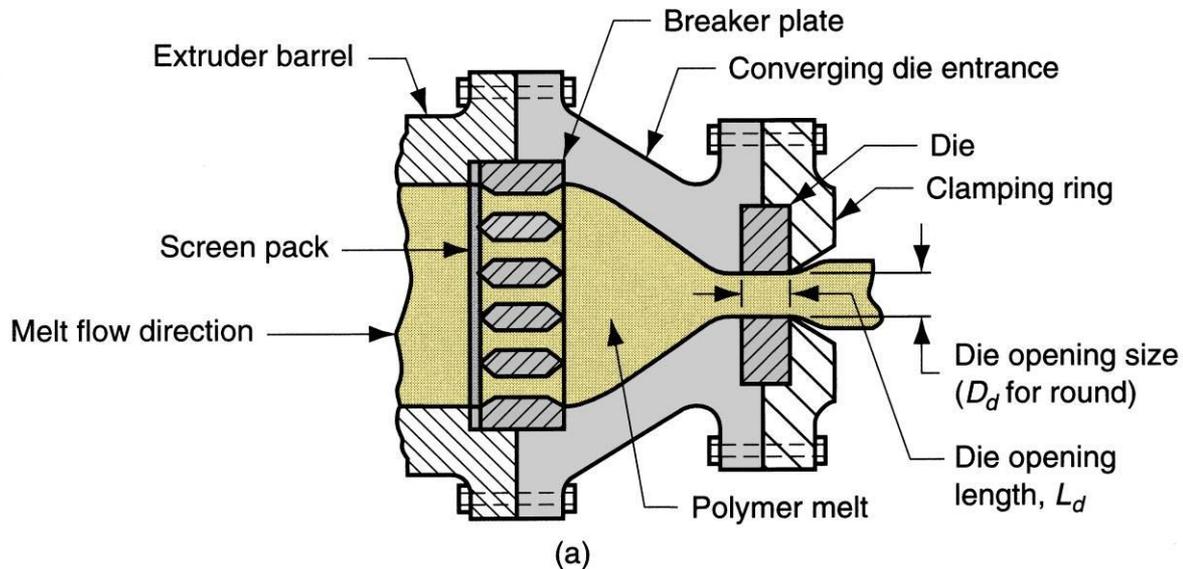


Figura: Expansão na matriz (“die swell”), uma manifestação de viscoelasticidade no polímero fundido, como mostrado aqui na saída da matriz de extrusão.

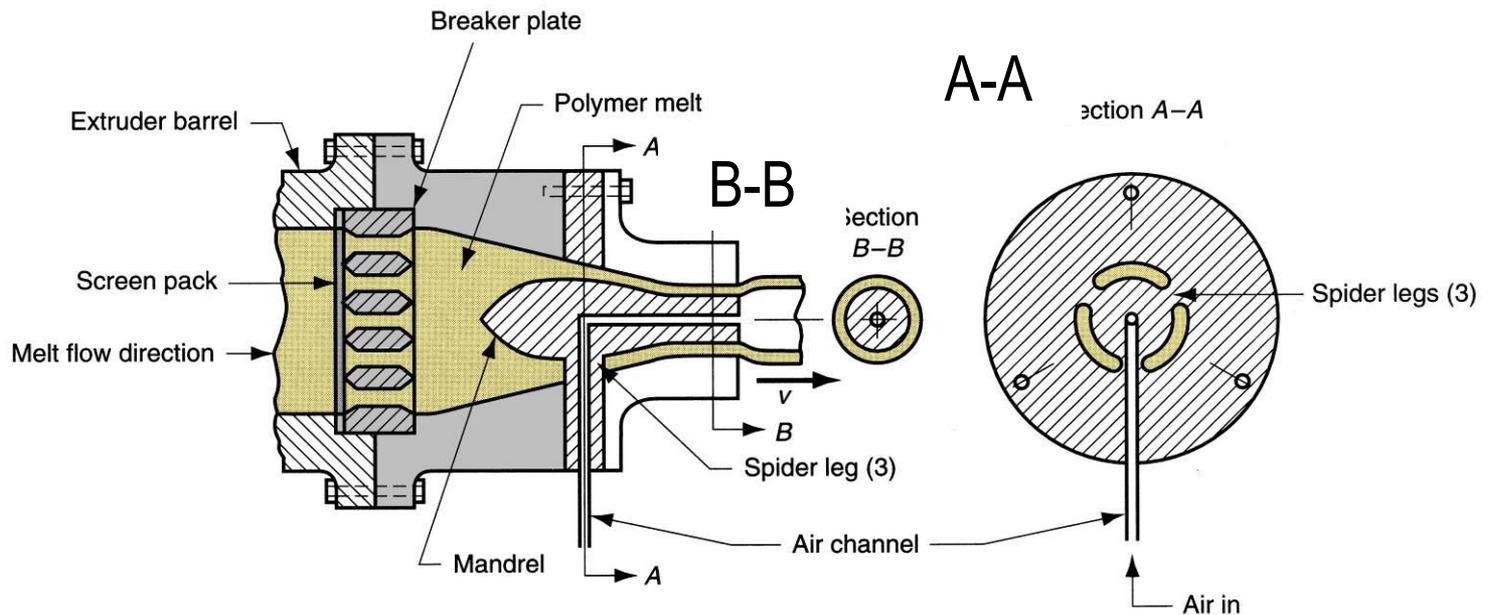
Extrusão: exemplos de Matrizes

- Figura: a) Vista lateral em corte de uma matriz de extrusão para um sólido com forma regular, tal como uma barra com seção circular; (b) Vista frontal da matriz, com o perfil do extrudado. A expansão do material devido a propriedade de viscoelasticidade é evidenciado.



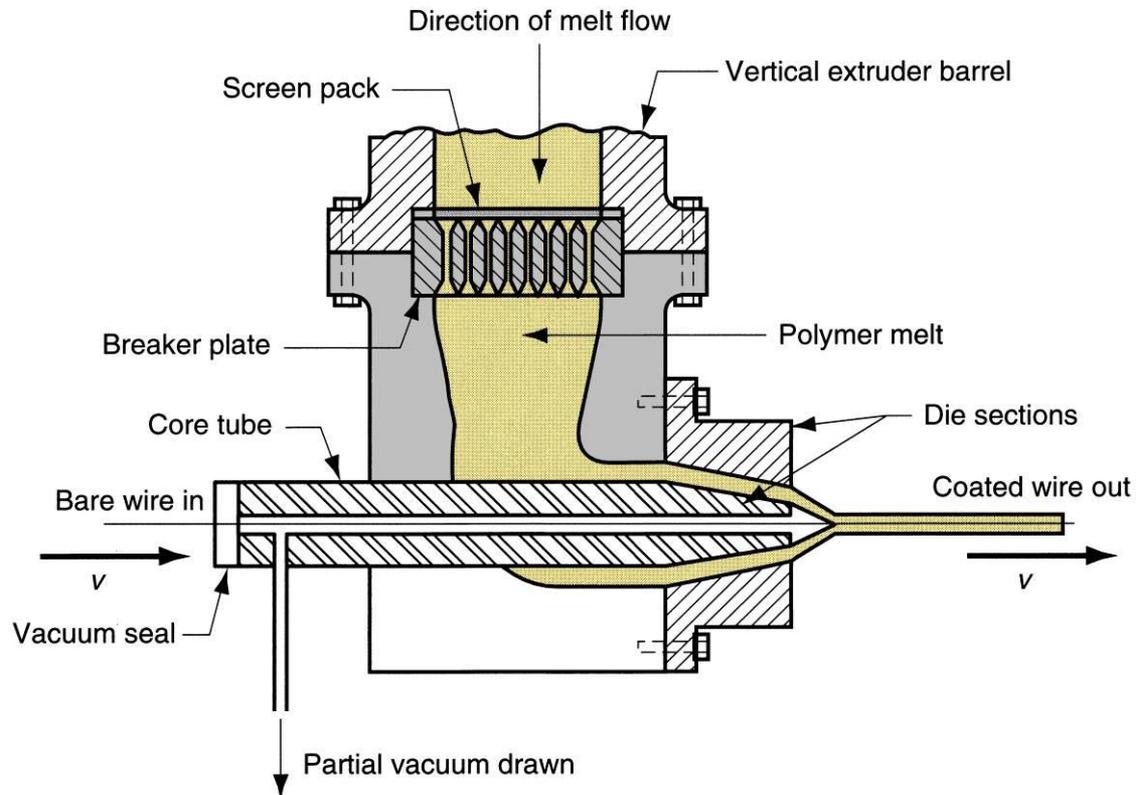
Extrusão: exemplos de Matrizes

- Figura: Vista lateral em corte de uma matriz de extrusão usada para fabricação de tubos e mangueiras; Seção A-A é a vista frontal mostrando como o mandril é mantido no lugar; Seção B-B mostra a seção transversal do tubo um instante após a passagem do polímero fundido pela matriz; a expansão devido a viscoelasticidade provoca o aumento no diâmetro.



Extrusão: exemplos de Matrizes

- Figura: Vista lateral em corte da matriz usada para encapar de fios elétricos através de extrusão.



Moldagem por sopro

- Processo de moldagem no qual o ar pressurizado é usado para inflar plástico no estado fundido no interior de uma cavidade
- Importante na fabricação de peças ocas de plástico com paredes finas, tais como garrafas
- Os produtos fabricados por esse processo recebem aplicação em larga escala

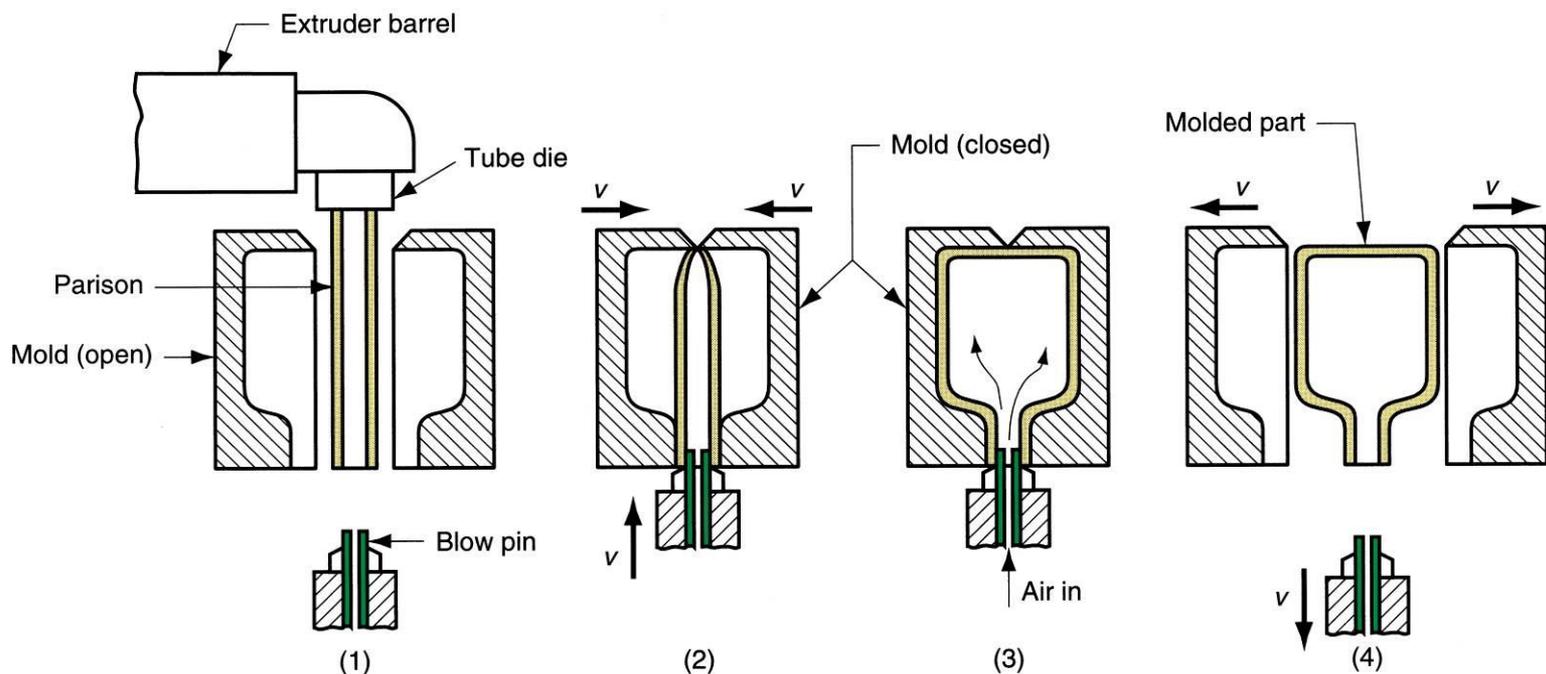


O processo Moldagem por sopro

- O processo ocorre em duas etapas:
 - 1) Fabricação do extrudado, denominado de *parison*
 - 2) Inflar o *parison* até adquirir sua forma final
- A formação do *parison* pode se dar tanto através da extrusão como da moldagem por injeção

Moldagem por sopro com Extrusão

Figura: Moldagem por sopro com extrusão: (1) extrusão do *parison*; (2) *parison* é “pinçado” por um molde bipartido e hermeticamente fechado com um bico de ar acoplado; (3) o tubo então infla o ar e expande o polímero até que ele se conforme com a cavidade do molde; e (4) molde é aberto e a peça solidificada é removida.



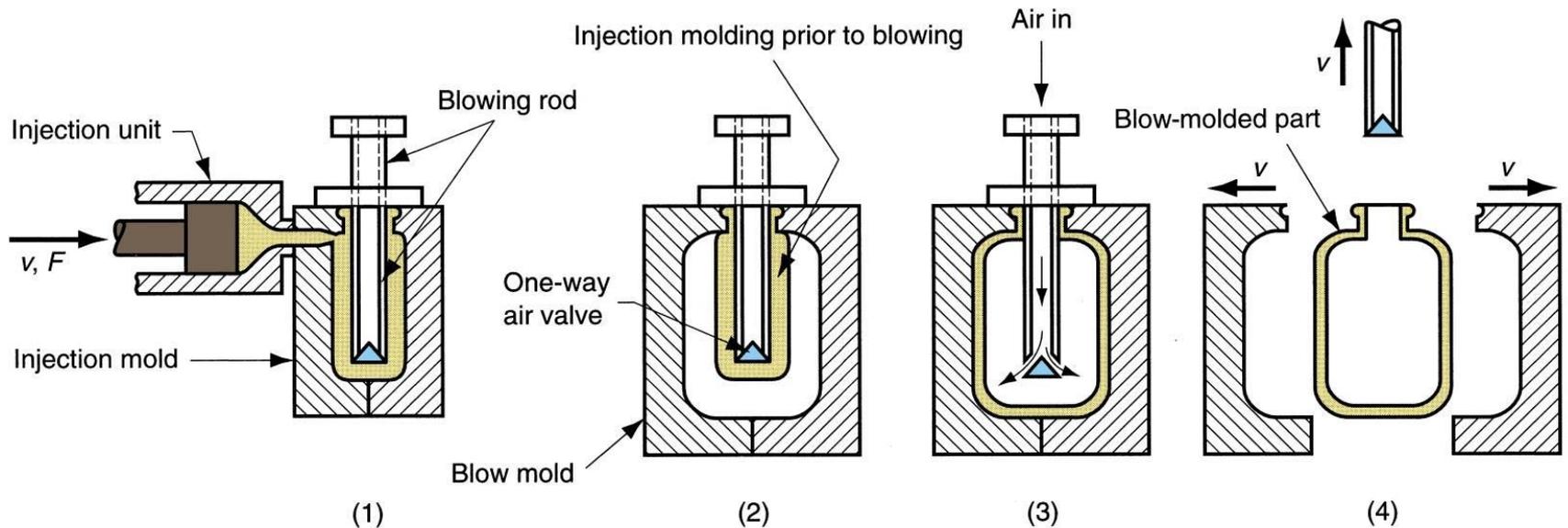


Materiais e produtos moldados por sopro

- A moldagem por sopro se limita aos termoplásticos
- Materiais: HDPE, polipropileno (PP), polivinilclorídrico (PVC), e polietileno teraftalato
- Produtos: recipientes descartáveis para bebidas e outros líquidos consumíveis, grandes recipiente (bombonas) para líquidos ou pós (55 galões), Tanques para armazenagem (2000 galões), tanques de gasolina, brinquedo, e cascos para pequenas embarcações

Moldagem por sopro com Injeção

Figura Moldagem por sopro com Injeção: (1) peça é injetada no interior da cavidade de um molde; (2) a peça é retirada e transferida para o molde onde será soprada; (3) a peça recebe sopro com ar quente para amolecer o polímero e expandir até se conformar com a parede do molde; e (4) O molde é aberto e a peça pronta é removida



Extrusão - Análise do processo

Legenda

D: diâmetro

φ : ângulo de hélice

dc: profundidade do canal

N: rotação do parafuso

W_c : largura do canal

W_f : largura do filete

δ : folga radial

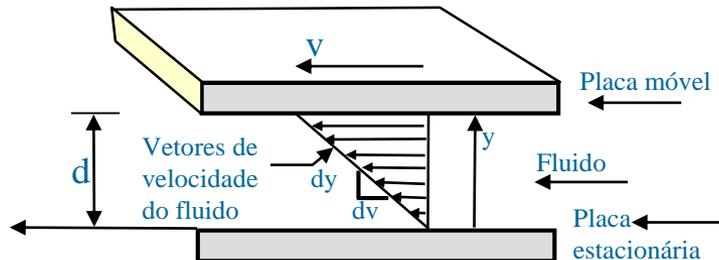
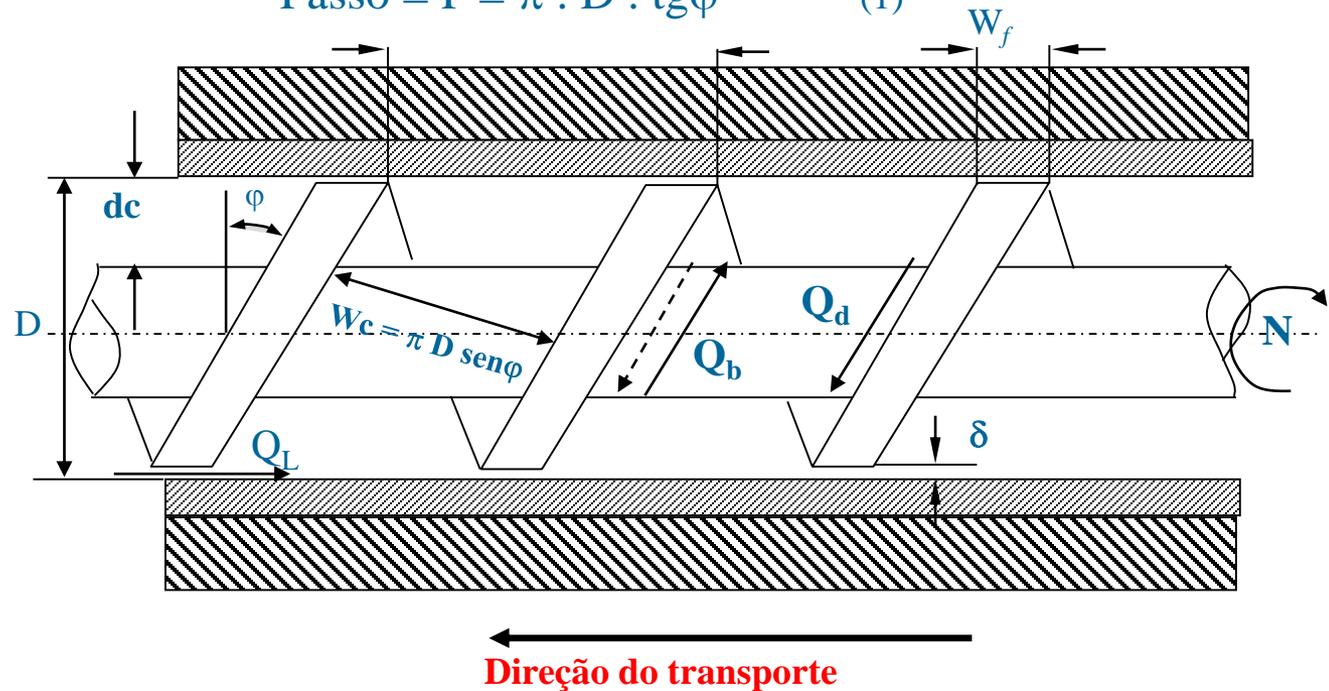
Q_d : fluxo volumétrico do escoamento de arraste

Q_b : fluxo volumétrico do escoamento de contra-pressão

Q_L : fluxo volumétrico da pressão de vazamento

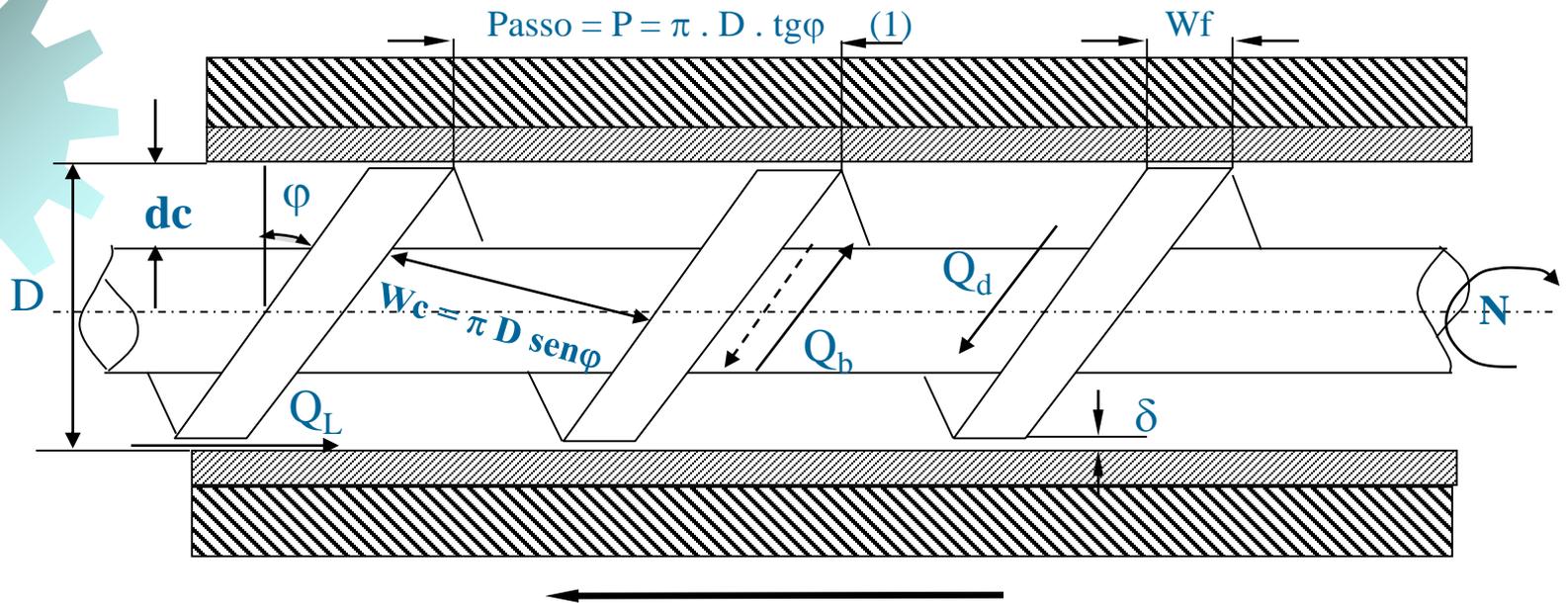
Princípio: parafuso de Arquimedes ou rosca sem fim

$$\text{Passo} = P = \pi \cdot D \cdot \text{tg}\varphi \quad (1)$$



Nesse caso a superfície rotativa do parafuso corresponde à placa móvel no modelo.

Extrusão - Análise do processo



Direção do transporte

Fluxo volumétrico (Q_x):

$$Q_x = Q_d - Q_b - Q_L$$

Desprezando o escoamento por vazamento Q_L , temos

$$Q_x = Q_d - Q_b$$

Extrusão - Análise do processo

Extrusora com 1 Parafuso:

$$Q_d = (1/2 \cdot v) \cdot d \cdot w \quad (2)$$

$$v = \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$d = d_c \quad (4)$$

d é a distância de separação entre as duas placas do modelo

$$w = w_c = \pi \cdot D \cdot \sin \varphi \quad (5)$$

w é a largura das placas, perpendicularmente à direção da velocidade (em m)

Portanto, substituindo (3), (4) e (5) em (2):

$$Q_d = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot d_c \cdot N \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \quad (6)$$

i.e.,

$$Q_d \sim d_c ; \varphi ; D^2 \quad (\text{Parâmetros de Projeto})$$



Extrusão - Análise do processo

Fluxo volumétrico do escoamento de contra-pressão (ou escoamento retroativo) gerada na zona de dosagem

$$Q_b = K_b (p \cdot d_c^3) \cdot (\eta \cdot L)^{-1}$$

porém $K_b = (1/12) \cdot \pi \cdot D \cdot \text{sen}^2 \varphi$ e, portanto:

$$Q_b = \frac{\pi \cdot D \cdot d_c^3 \cdot \text{sen}^2 \varphi}{12 \cdot \eta} \left(\frac{dp}{dl} \right) \quad (7)$$

Q_b : fluxo volumétrico do escoamento de contra pressão (m^3/s)

p : pressão (MPa)

L comprimento do parafuso

dp/dl : gradiente de pressão (MPa/m)

η : Viscosidade ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)

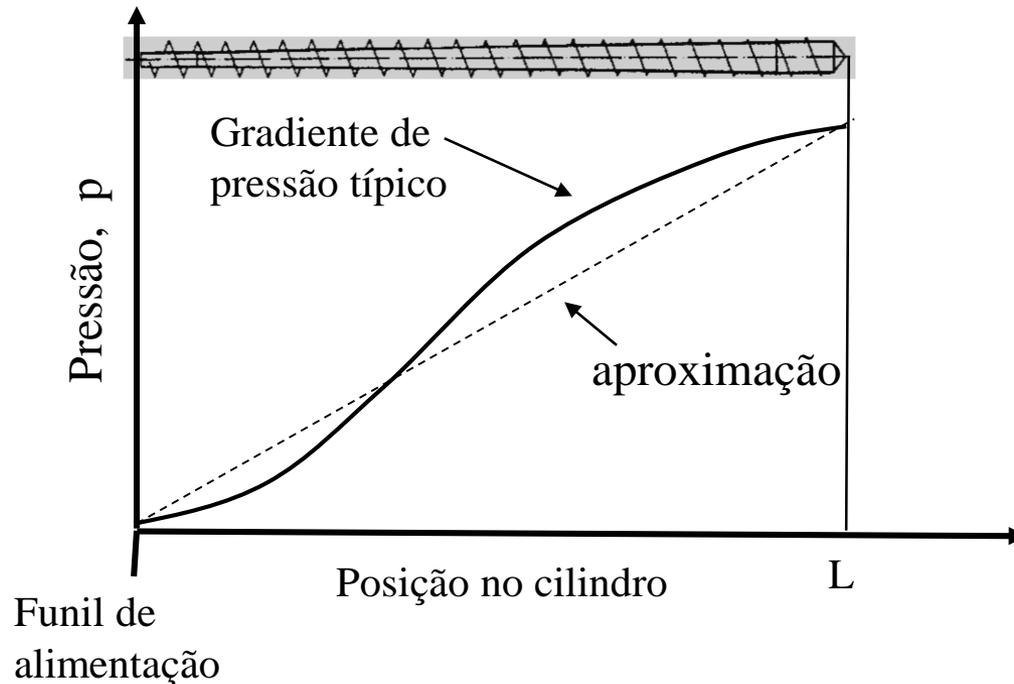
$Q_b \sim (p \cdot d_c^3 \cdot D) \cdot (12 \cdot \eta \cdot L)^{-1}$ (**Parâmetros de processo**): definem a geometria do parafuso e do corpo da extrusora

Extrusão - Análise do processo

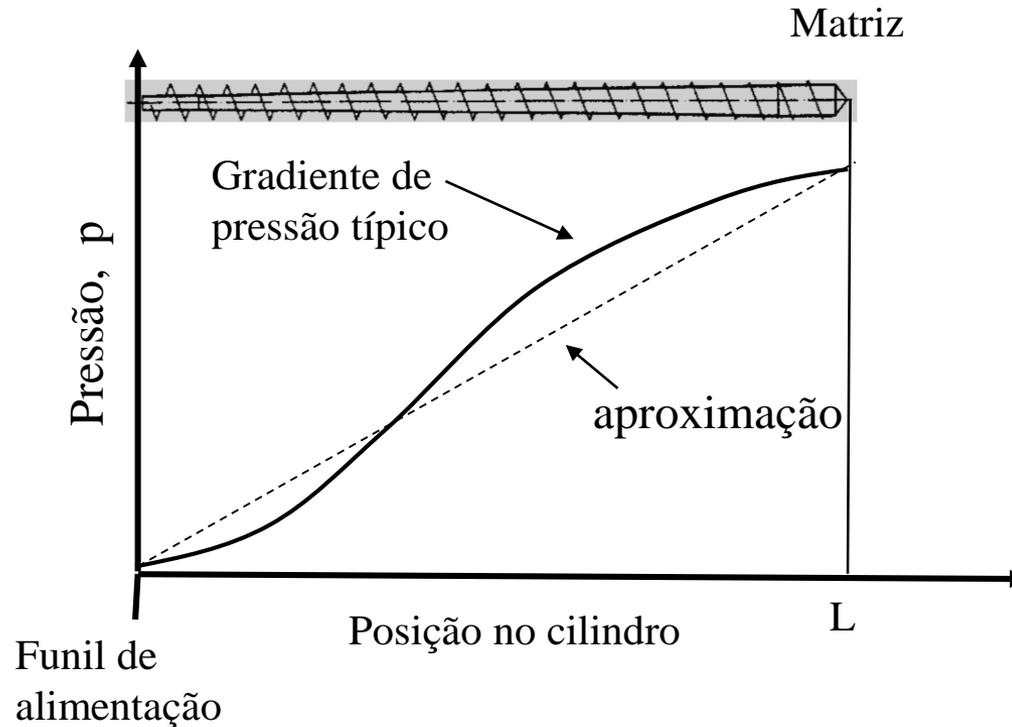
O verdadeiro gradiente de pressão na extrusora é função da forma do parafuso ao longo do seu comprimento; um perfil típico é dado pela figura abaixo:

$$Q_b = \frac{\pi \cdot D \cdot d_c^3 \cdot \text{sen}^2 \varphi}{12 \cdot \eta} \left(\frac{dp}{dl} \right)$$

Matriz



Extrusão - Análise do processo



Se assumirmos como uma aproximação uma linha reta para o perfil do gradiente de pressão (linha tracejada), então o gradiente de pressão torna-se uma constante p/L e a equação 7 passa a ser assim:

$$Q_b = \frac{p \cdot \pi \cdot D \cdot d_c^3 \cdot \text{sen}^2 \varphi}{12 \cdot \eta \cdot L} \quad (8)$$

p: pressão máxima no cilindro (MPa)

L comprimento do cilindro (m)

Extrusão - Análise do processo

Dessa forma, pode-se estimar a magnitude (Q_x) do fluxo volumétrico do fundido em uma extrusora como a diferença entre Q_d e Q_b :

$$Q_x = Q_d - Q_b \quad (9)$$

Portanto:

$$Q_x = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot d_c \cdot \text{sen} \varphi \cdot \cos \varphi - \left(\frac{p \cdot \pi \cdot D \cdot d_c^3 \cdot \text{sen}^2 \varphi}{12 \cdot \eta \cdot L} \right) \quad (10)$$

A equação (10) assume o vazamento entre o filete e o cilindro como sendo mínimo.

A equação (10) possui tanto os parâmetros de projeto como de processo (operacionais). Parâmetros de processo são aqueles que podem ser alterados durante o processamento.

Extrusão - Análise do processo

Se a contra-pressão fosse igual a zero ($Q_b = 0$), de maneira que o escoamento do fundido esteja sem restrição na extrusora, então o escoamento igualaria ao escoamento de arraste Q_d (Equação). $Q_x = Q_d - Q_b$

Dado os parâmetros de projeto e de processo, esta é capacidade máxima de escoamento possível da extrusora, assim:

$$Q_{max} = Q_d = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot d_c \cdot N \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

Por outro lado, se a contra pressão for tão elevada de forma que o escoamento seja zero ($Q_x=0$), então a contra pressão igualaria ao escoamento de arraste:

$$Q_x = Q_d - Q_b = 0, \text{ de forma que } Q_d = Q_b$$

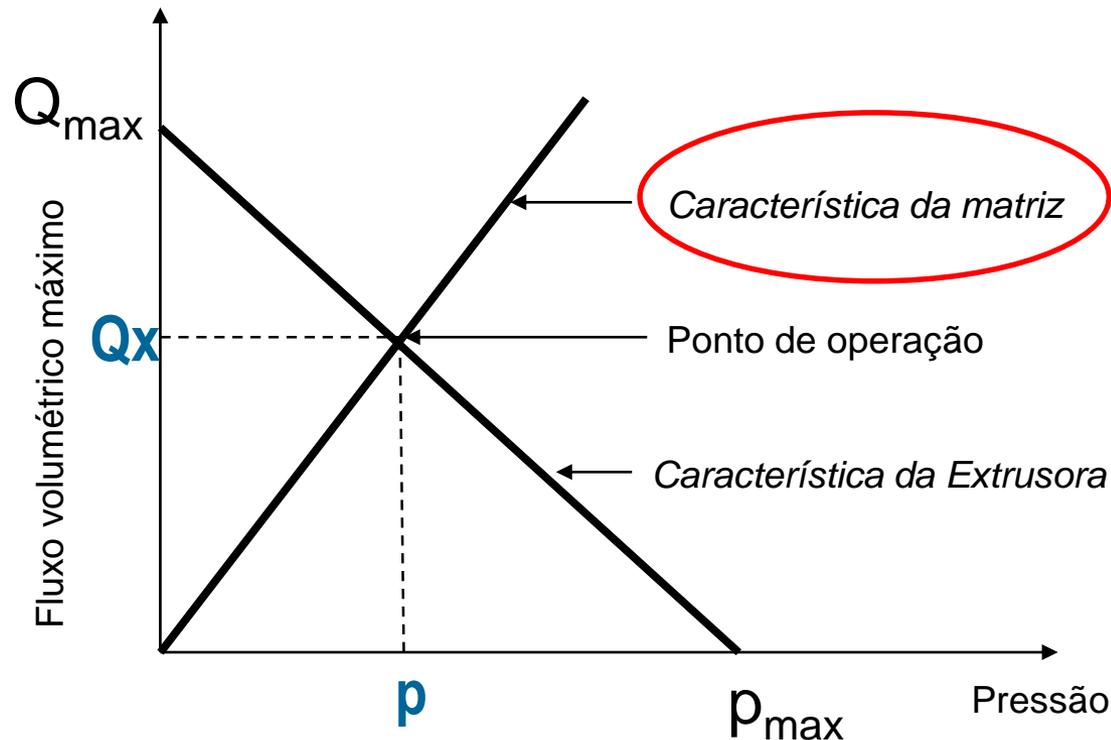
Usando a expressão para Q_d e Q_b , pode-se encontrar p_{max}

$$p_{max} = 6 \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot L \cdot \eta \cdot \cot \varphi \cdot (d_c)^{-2}$$

Os valores de Q_{max} e de p_{max} são os pontos sobre os eixos no diagrama conhecido como **Característica da extrusora**

Extrusão - Análise do processo

Com a matriz posta na extrusora e o processo em andamento, os valores de Q_x e de p estarão em algum lugar entre os dois extremos, sendo determinados pela característica da matriz.





Extrusão - Análise do processo

O fluxo volumétrico através da matriz depende:

- a) do tamanho,
- b) do formato da abertura e
- c) da pressão aplicada para forçar o fundido através dela

Ela pode ser expressa por:

$$Q_x = K_s \cdot p$$

Q_x : fluxo volumétrico (m^3/s)

P : pressão em (Pa)

K_s : fator de forma da matriz (m^5/Ns).

Extrusão - Análise do processo

Para uma **forma circular da abertura** para um dado comprimento de canal, o fator de forma pode ser calculado:

$$K_s = \frac{\pi \times D_m^4}{128 \times \eta \times L_m}$$

- D_m : diâmetro de abertura da matriz (m)
 η : viscosidade do fundido (N.s/m²)
 L_m : comprimento da abertura (m)

Extrusão - Exemplo

Exemplo1 : Uma extrusora com cilindro com diâmetro $D = 75 \text{ mm}$. O parafuso rotaciona a $N = 1 \text{ rev/s}$. A profundidade do canal $d_c = 6,0 \text{ mm}$ e o ângulo de hélice $\varphi = 20^\circ$. A pressão $p = 7,0 \times 10^6 \text{ Pa}$, o comprimento do cilindro é $L = 1,9 \text{ m}$, e a viscosidade do polímero fundido é assumida como $\eta = 100 \text{ N.s/m}^2$. Determine o fluxo volumétrico (Q_x) do plástico no cilindro.

$$Q_x = Q_d - Q_b$$

$$Q_d = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot d_c \cdot N \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = 0,5 \cdot \pi^2 \cdot (75 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (6 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 \cdot \sin(20^\circ) \cdot \cos(20^\circ) =$$

$$Q_d = 53,525 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_b = \frac{p \times \pi \times D \times d_c^3 \times \sin^2 \varphi}{12 \times \eta \times L} = \frac{7 \cdot 10^6 \times \pi \times 75 \cdot 10^{-3} \times 6 \cdot 10^{-3} \times (\sin 20^\circ)^2}{12 \times 100 \times 1,9}$$

$$Q_b = 18,276 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_x = Q_d - Q_b = 53,525 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s} - 18,276 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s} = 35,249 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

Extrusão - Exemplo



Exemplo 2. Considerando a mesma extrusora do exemplo anterior, determine:

a) Q_{\max} e p_{\max}

b) O fator de forma K_s para uma abertura circular da matriz na qual $D_m = 6,5 \text{ mm}$ e $L_m = 20 \text{ mm}$

c) Os valores de Q_x e p no ponto de operação

Extrusão - Exemplo

a) Q_{max} e P_{max}

$$Q_{max} = 0,5 \times \pi^2 \times D^2 \times N \times d_c \times \text{sen } \varphi \times \text{cos } \varphi =$$

$$Q_{max} = 0,5 \times \pi^2 \times (75 \times 10^{-3})^2 \times 1 \times (6 \times 10^{-3}) \times \text{sen } 20^\circ \times \text{cos } 20^\circ =$$

$$Q_{max} = 53,525 (10)^{-9} \frac{m^3}{s}$$

$$P_{max} = \frac{6 \times \pi \times D \times N \times L \times \eta \times \text{cot } \varphi}{d_c^2}$$

$$P_{max} = \frac{6 \times \pi \times (75 \times 10^{-3})^2 \times 1 \times 1,9 \times 100 \times \text{cot } 20^\circ}{(6 \times 10^{-3})^2}$$

$$P_{max} = 20,5 \text{ MPa}$$

Extrusão – Exemplo

b) O fator de forma K_s para uma abertura circular da matriz na qual $D_m = 6,5 \text{ mm}$ e $L_m = 20 \text{ mm}$;

$$K_s = \frac{\pi \times D_m^4}{128 \times \eta \times L_m}$$

$$K_s = \frac{\pi \times (6,5 \times 10^{-3})^4}{128 \times 100 \times 20 \times 10^{-3}}$$

$$k_s = 21,9 \times 10^{-12} \frac{\text{m}^5}{\text{N} \times \text{s}}$$

Extrusão - Exemplo

c) Os valores de Q_x e p no ponto de operação

$$Q_x = Q_{max} - \left(\frac{Q_{max}}{p_{max}} \right) \times p$$

$$Q_x = 53,525 \times 10^{-9} - \left(\frac{53,525 \times 10^{-9}}{20.499.874} \right) \times p$$

$$Q_x = 53,525 \times 10^{-9} - 2,611(10^{-12}) \times p$$

A característica da Matriz é dada pela equação abaixo usando o valor de K_s calculado no item b

$$Q_x = 21,9 \times (10^{-12}) \times p$$

Extrusão - Exemplo

c) Igualando as duas equações, obtemos

$$Q_x = Q_{max} - \left(\frac{Q_{max}}{p_{max}} \right) \times p = K_s \times p$$

$$53.524 \times 10^{-9} - 2,611 \times 10^{-12} \times p = 21,9 \times 10^{-12} \times p$$

$$p = \frac{53.525 \times 10^{-9}}{24,511 \times 10^{-12}} = 2,184 \times 10^6 Pa$$

Resolvendo para Q_x , usando uma das equações iniciais, obtemos:

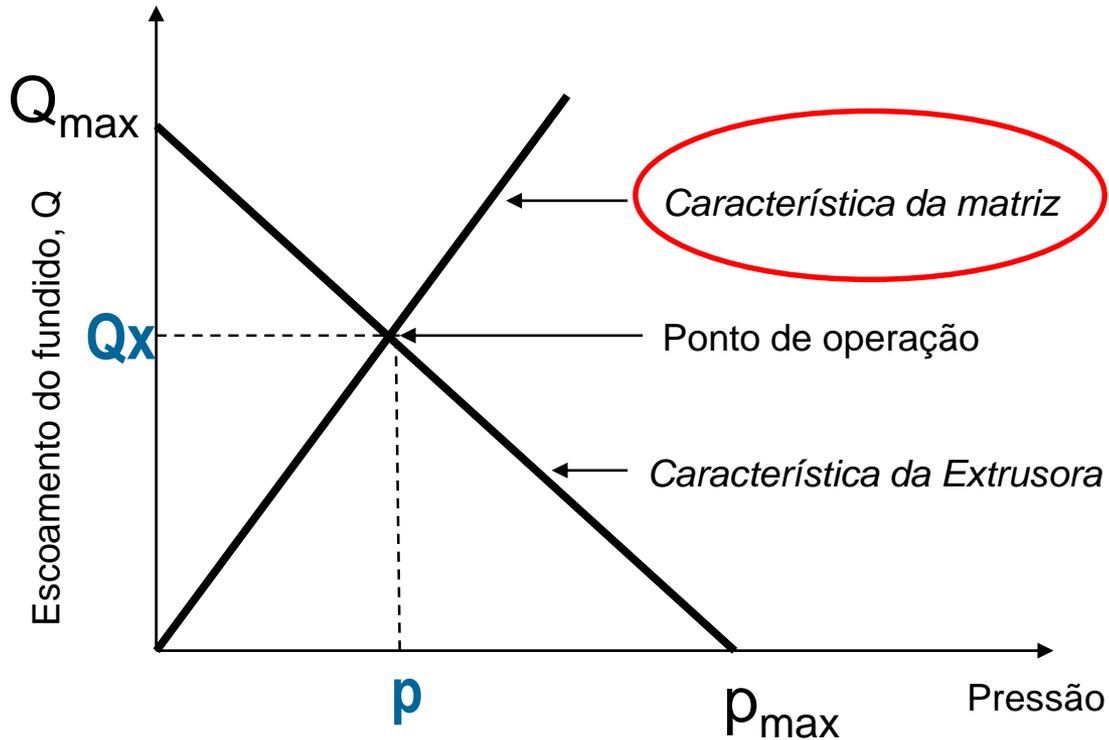
$$Q_x = 53.525 \times 10^{-6} - (2.611 \times 10^{-12} \times 2,184 \times 10^6)$$

$$Q_x = 47,822 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

ou para Q_x , obtemos:

$$Q_x = 21,9 \times 10^{-12} \times 2,184 \times 10^6 = 47,82 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Extrusão - Exemplo



$$Q_{\max} = 53,525 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$
$$p_{\max} = 20,5 \text{ MPa}$$

$$Q_x = 47,822 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$
$$p = 2,184 \text{ MPa}$$