



Departamento de Engenharia de Materiais (SMM)
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)
Universidade de São Paulo (USP)

SMM0315 – Processamento de Materiais IX: Polímeros

Docente: Marcelo A. Chinelatto

Março – Julho de 2025

1

Plastificação do Polímero

As figuras abaixo exemplificam como o processo de plastificação ocorre em uma extrusora, dentro da zona de compressão.

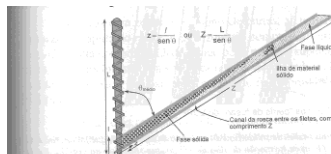
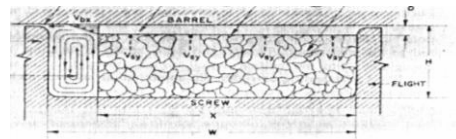
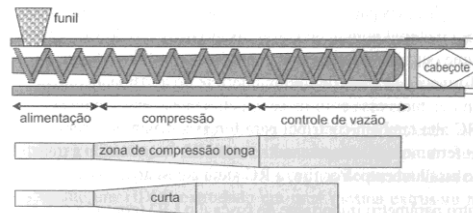


Figura 3.24 - Distribuição da razão sólido/líquido dentro do canal da rosca desde o funil até a extremidade. O cordão sólido perdura até quase o final da rosca, evitando que o ar vá para frente e seja aprisionado na fase líquida. Se o ar for junto com a massa fundida, o produto extrudado conterá bolhas e microbolhas altamente prejudiciais, bem como esse ar, ao esquentar e sob alta pressão, acelera o processo de degradação da resina.

2

A geometria da rosca, conforme mostrado abaixo, afeta a plastificação do polímero pelo fato de atingir as características de transferência de calor, a taxa de cisalhamento e a uniformidade da vazão.



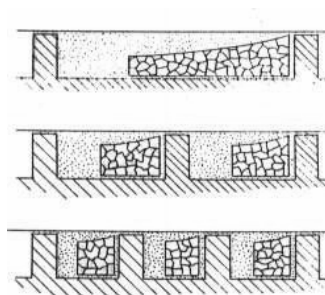
Roscas com zonas de compressão longas: ↑ tempo de residência; maior tempo de convivência sólido/líquido; ↓ cisalhamento; baixo poder de mistura.

Roscas com zonas de compressão curtas: ↓ tempo de residência podendo originar superaquecimento localizado, principalmente se ↑ viscosidade e pontos de fusão bruscos como é o caso do náilon.

3

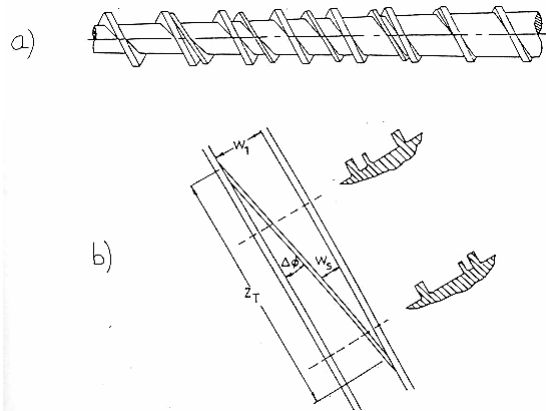
Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples

O processo de fusão pode ser acelerado se na zona de compressão da rosca forem utilizados mais do que um filete nesta região. Neste caso um canal estará preenchido com leito de sólidos, enquanto o outro estará preenchido com polímero fundido.



4

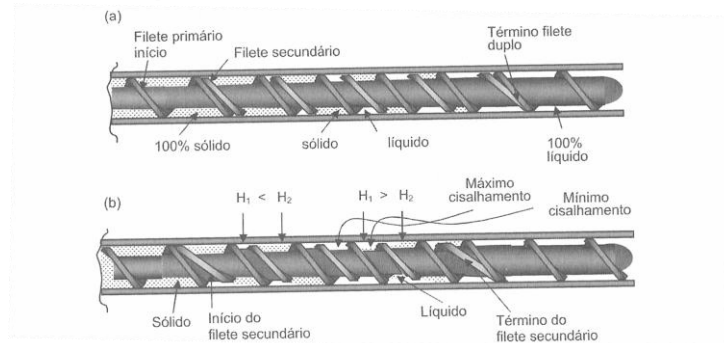
Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples



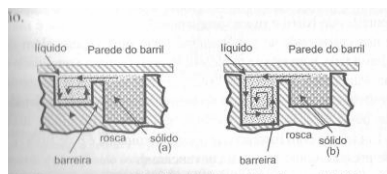
Exemplo de uma rosca com filete múltiplo ou filete divisor

5

Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples



Esquema de roscas com filetes duplos – a) tipo Maillefer e b) tipo Barr.

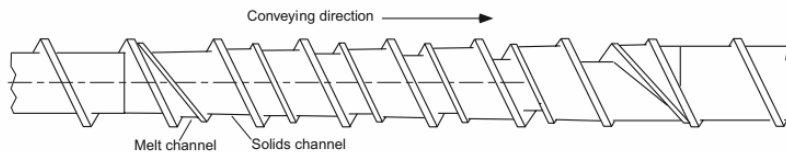


6

Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples



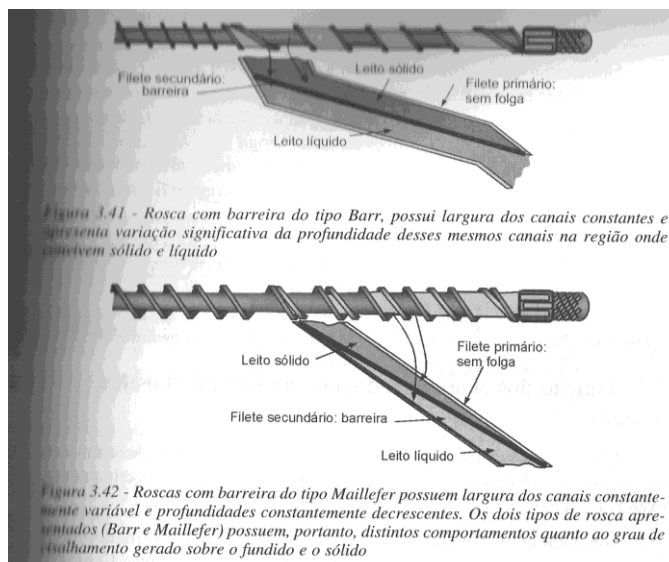
Esquema de roscas com filetes duplos tipo Maillefer.



Esquema de roscas com filetes duplos tipo Barr.

7

Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples



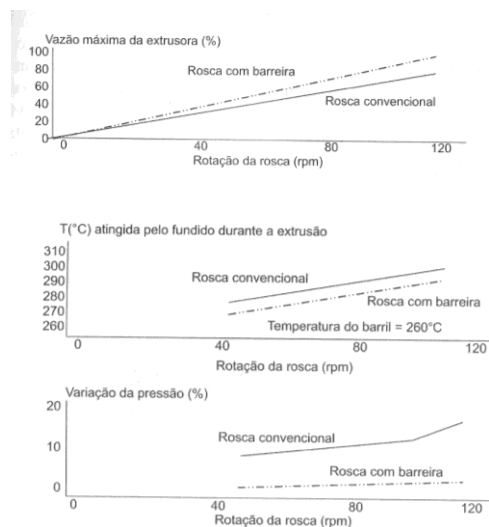
8

Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples

- **Barreira tipo Barr:** nesse caso o filete secundário tem ângulo de hélice igual ao ângulo da hélice do filete primário, diferindo apenas no seu início e fim. A profundidade do canal também difere (onde o líquido se aloja ela é crescente e onde o sólido fica decrescente), mantendo a largura b dos dois canais invariáveis ao longo da zona de fusão.
- **Barreira tipo Maleifer:** possui hélices com passos diferentes (normalmente o passo da segunda hélice é maior do que o do primário). Um deles fica o sólido e o outro o líquido polimérico.

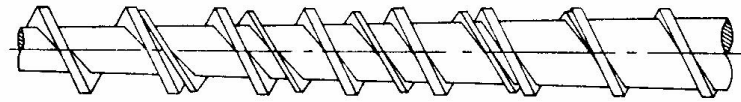
9

Comparações entre roscas convencionais e roscas com barreiras.

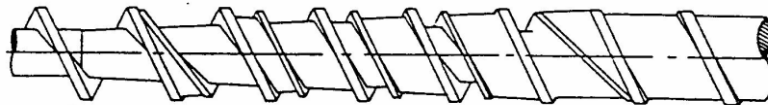


10

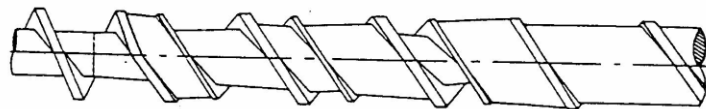
Otimização da Plastificação em uma Extrusora Rosca Simples



Rosca tipo Maillefer



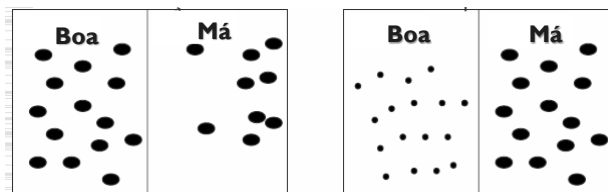
Rosca tipo Barr



Rosca de Dray e Lawrence

11

Elementos de Mistura – Distributivos e Dispersivos



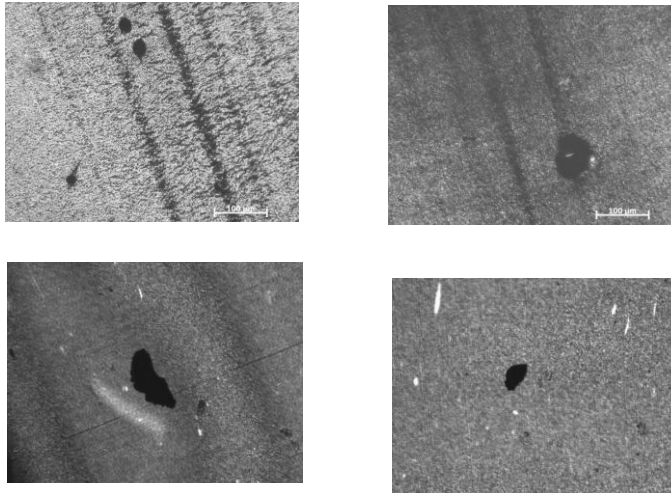
Distribuição

Dispersão

Elementos de mistura distributiva são importantes em todas as operações de extrusão. Os elementos de mistura dispersivos são indispensáveis para a quebra de aglomerados de partículas na fabricação de compostos, compósitos e nanocompósitos poliméricos.

12

Dispersão de Negro de Fumo em Tubos de PEAD



13

Regras para aumentar a mistura

Um caminho simples para melhorar a mistura em uma extrusora de rosca simples é aumentar a restrição ao fluxo pelo, por exemplo, aumentar a densidade do pacote de telas na grelha.

Esta tentativa, entretanto, resulta em uma contribuição relativamente pequena na eficiência de mistura. Ao mesmo tempo, a vazão final diminui, o tempo de residência aumenta, a distribuição do tempo de residência amplia, a temperatura aumenta e os processos degradativos se intensificam.



Por estas razões, aumentar a restrição do fluxo não é o melhor caminho para se melhorar a eficiência de mistura de uma extrusora.

14



Regras para aumentar a mistura

1. A seção de mistura deve ter uma queda mínima de pressão, preferencialmente tendo uma capacidade de bombeamento para frente.
2. Não apresentar material parado ou pontos mortos na seção de mistura
3. O dispositivo de mistura deve limpar completamente a superfície do barril.
4. O dispositivo de mistura deve ser de fácil desmontagem, limpeza e montagem
5. O dispositivo deve ter preço razoável

15



Elementos de Mistura Distributiva

- A eficiência de mistura distributiva requer **uma substancial deformação cisalhante** com **ocasional reorientação do fluxo**.

Portanto, as seções de mistura distributivas devem submeter o fluido a uma significativa deformação cisalhante e frequentemente dividir o fluxo buscando maximizar a reorientação do fluxo.

16

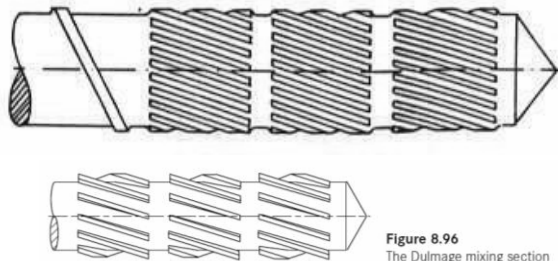
Elementos de Mistura Distributiva

Os elementos de mistura distributivos podem ser classificados em:

- a) misturadores com filete ranhurados;
- b) misturadores de pinos;
- c) misturadores com cavidades e,
- d) misturadores com profundidade variável.

17

Elementos de Mistura Distributiva



Elemento de mistura distributiva do tipo *Dulmage* (Dow).

Combina uma boa mistura distributiva com pequena queda de pressão.

Falha: devido as ranhuras circunferenciais, a superfície do barril é somente parcialmente limpa.

18

Elementos de Mistura Distributiva

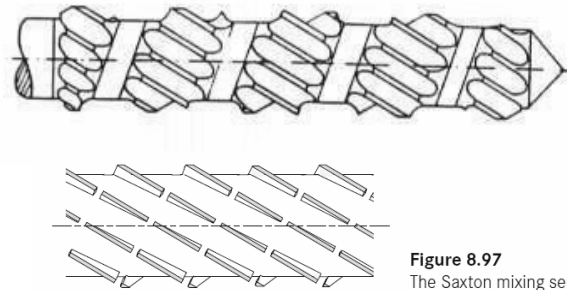


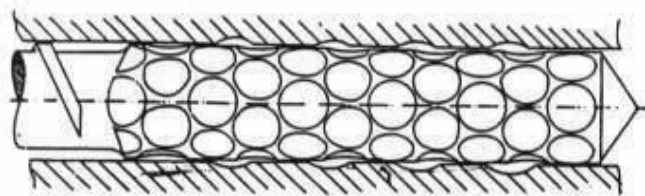
Figure 8.97
The Saxton mixing section

Elemento de mistura do tipo *Saxton*.

Este elemento de mistura baseia-se em um bom entendimento dos requisitos para a mistura distributiva e, em geral, melhorará o desempenho da rosca de extrusão.

19

Elementos de Mistura Distributiva



Elemento de mistura do tipo *CTM*.

A seção de mistura *CTM*, apresentada possui boa capacidade de mistura distributiva. Entretanto transgride as regras de (1.) a (4.). Portanto, pode se esperar que durante a operação da extrusora a ocorrência de problemas devido a geração de pontos de estagnação, degradação, além de proporcionar tempos longos de parada de máquina para troca de material.

20

Elementos de Mistura Distributiva

◦ Cavity Transfer Mixers



Figure 33 STAROMIX.

21

Elementos de Mistura Distributiva

◦ Cavity Transfer Mixers

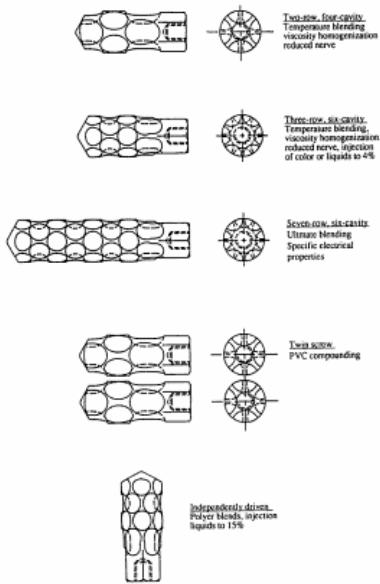
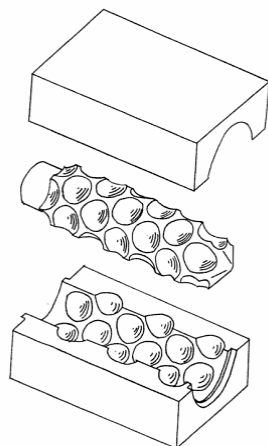


Figure 35 Variety of CTM's.

22

Elementos de Mistura Distributiva

Twente Mixing Ring (variação do CTM)

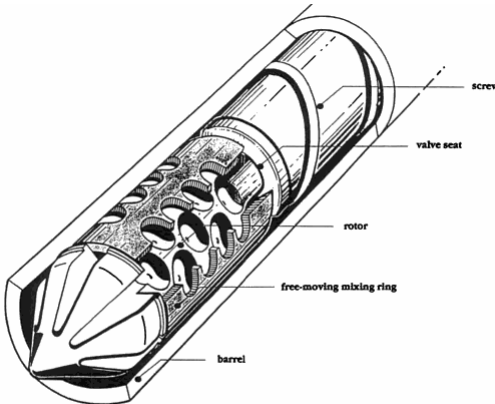


Figure 36 Twente Mixing Ring (TMR).

23

Elementos de Mistura Distributiva

Misturadores tipo pinos

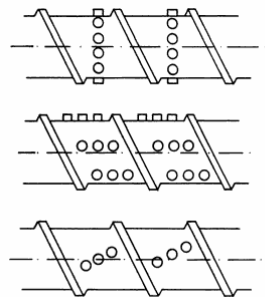


Figure 37 Various mixing pin patterns.

Misturadores tipo Blockhead

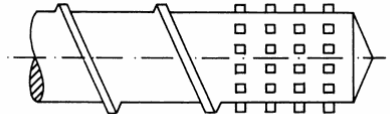


Figure 39a Blockhead mixing section.

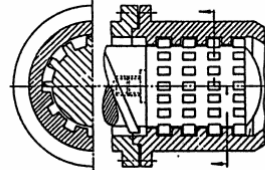


Figure 39b Double blockhead.

24

Elementos de Mistura Distributiva

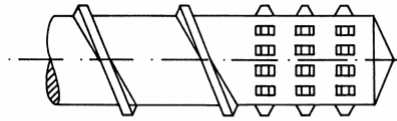


Figure 40 Trapezoidal mixing ring.

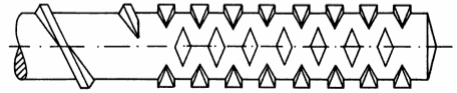


Figure 41 Pineapple mixing section.

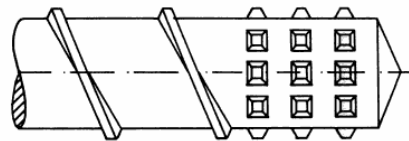


Figure 42 Square pineapple mixing section.

25

Elementos de Mistura Distributiva

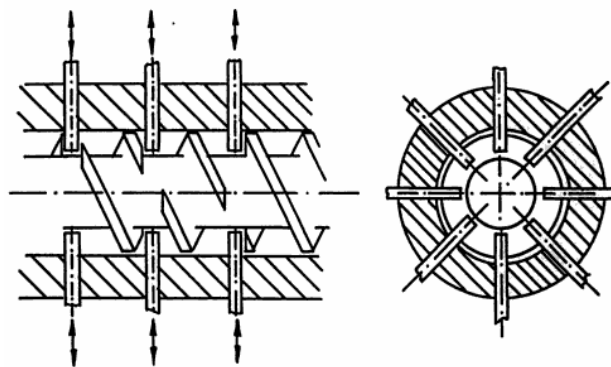


Figure 43 Pin barrel extruder.

26

Elementos de Mistura Distributiva

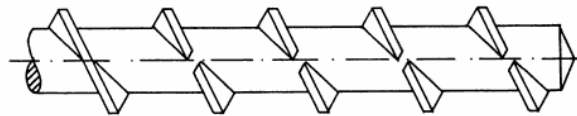


Figure 44 Axon mixing screw.

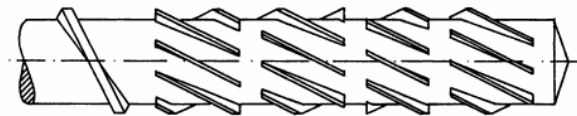


Figure 45 Dulmage mixing section.

27

Comparação entre os Elementos de Mistura Distributiva

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DE VÁRIOS DISPOSITIVOS PARA MISTURA DISTRIBUTIVA							
Seção de Mistura distributiva	A	B	C	D	E	F	G
Pins (22)*	-	-	0	+	++	-	+
Dulmage (27)	+	+	-	+	+	+	++
Saxton (30)	+	+	++	+	+	+	++
CTM (17)	--	0	-	--	--	+	++
Blockhead (17)	--	--	--	+	+	-	+
Pineapple (25)	-	+	0	+	+	+	++
Axon (28)	+	+	+	+	++	+	0
Stat-Dyn (26)	-	+	+	+	0	+	++
Double wave (24)	+	+	+	+	-	+	-
Pulsar (24)	+	+	+	+	0	0	-
Strat-blend (23)	+	0	+	+	0	0	-
Dray (21)	-	0	+	+	0	0	-

++ = bom; + razoável; 0 = neutro; - = fraco; -- = muito fraco.

- A. Queda de pressão
- B. Fluxo Laminar hidrodinâmico
- C. Limpeza do barril
- D. Facilidade de operação
- E. Custo de fabricação
- F. Deformação sob cisalhamento
- G. Corte de Fluxo com reorientação

28

Elementos de Mistura Dispersivos

° Dispositivos para **mistura dispersiva** devem submeter todos os elementos do fluido a um nível de **tensão de cisalhamento elevado**, uniforme e sob um tempo curto de duração para conseguir **quebrar os aglomerados** na matriz polimérica.

29

Elementos de Mistura Dispersivos

Para que uma seção de mistura seja um dispositivo eficaz de mistura dispersiva, ela deve ter as seguintes características:

- I. A seção de mistura deve possuir uma região de alta pressão onde o material é submetido a elevadas tensões;
- II. A região de alta pressão deve ser projetada de tal forma que a exposição às altas tensões seja de curta duração;
- III. Todos os elementos de fluido devem sofrer o mesmo nível de alta tensão para conseguir uma mistura uniforme.

30

Elementos de Mistura Dispersivos

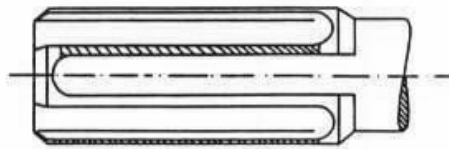


Elemento de mistura dispersiva do tipo *anel de bolha*(blister ring)

A tensão cisalhante no espaço entre a rosca e cilindro depende da distância, a ação cisalhante não será uniforme. Além disso a existência do anel transgride a regra (1.), sendo a seção de mistura menos conveniente.

31

Elementos de Mistura Dispersivos

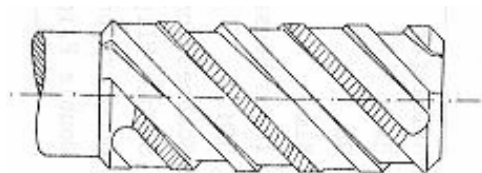


Elemento de mistura dispersiva do tipo *Union Carbide*(UC).

Um dispositivo para mistura, dispersiva, comumente utilizado é a seção de mistura chamada *Union Carbide*, ou UC. Esta seção de mistura canelada possui um ângulo helicoidal de 90 graus e, portanto, não tem capacidade de bombeamento em direção a saída da extrusora. Assim, a seção de mistura UC desrespeita as regras (1) e (2).

32

Elementos de Mistura Dispersivos



Elemento de mistura dispersiva do tipo *Egan*.

Uma seção de mistura canelada similar, é a seção de mistura conhecida como *Egan*. Essa seção de mistura possui caneluras helicoidais com ângulo em hélice iguais a 30 graus.

33

Comparação entre os Elementos de Mistura Dispersivos

**TABELA 2 - COMPARAÇÃO DE DISPOSITIVOS
PARA MISTURA DISPERSIVA**

Mixing Section	A	B	C	D	E	F
Blister (16)*	- -	o	-	+	+	-
Egan (25)	-	++	++	+	+	++
Gregory (16)	-	-	-	+	+	-
LeRoy (22)	-	-	++	+	+	++
Troester (23)	o	-	++	+	+	++
Dray (20)	-	+	+	+	+	-
Zorro (26)	++	++	++	+	-	++
Helical LeRoy (28)	++	++	++	+	+	++

++ = bom; + = razoável; o = neutro; - = fraco; - - = muito fraco.

- A. Queda de pressão
- B. Pontos mortos
- C. Limpeza do barril
- D. Facilidade de operação
- E. Custo de fabricação
- F. Mistura uniforme

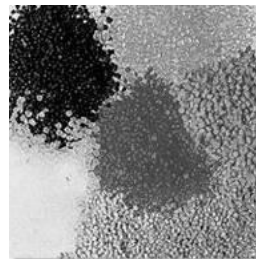
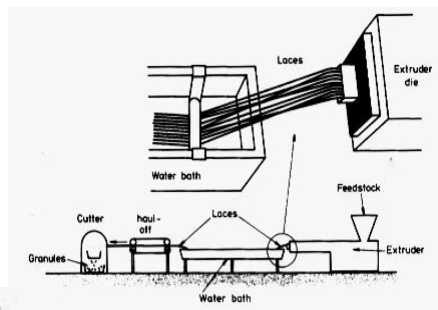
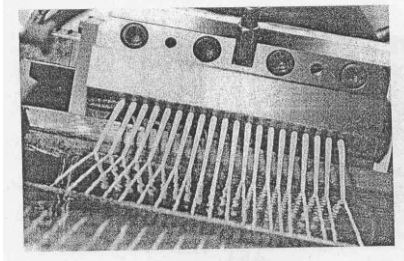
34

Sistemas Baseados no Processo de Extrusão

35

Sistemas de Granulação

1. O **extrudado** na forma de filamentos espessos, conhecidos popularmente como **macarrão** ou **espagete**, é **resfriado e picotado** (*chopped*) através de um acessório apropriado.



36

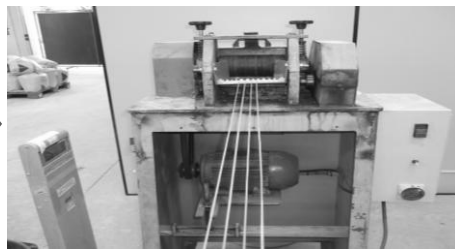
Sistemas de Granulação

Usado principalmente para fins de mistura.

Obtenção de semimanufaturados e não de produtos acabados.

37

Sistemas de Granulação



Extrusão de uma blenda de PP/SBS em extrusora dupla rosca co-rotacional.



38

Sistemas de Granulação



Extrusão de Polipropileno (PP) puro.

39

Sistemas de Granulação



Extrusão de PP Puro



**Extrusão da blenda de
PP/SBS**

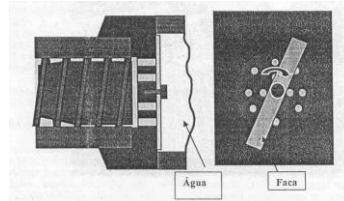
40

Sistemas de Granulação

2. Corte na Cabeça

- Evita o manuseio de vários espaguetes e a formação de longos e finos fios
- Sistema mais complexo
- Altas vazões e matriz com várias aberturas

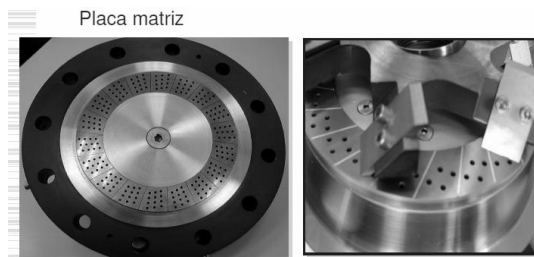
Grânulos são cortados na face da matriz e podem ser resfriados com ar, água ou ar e água.



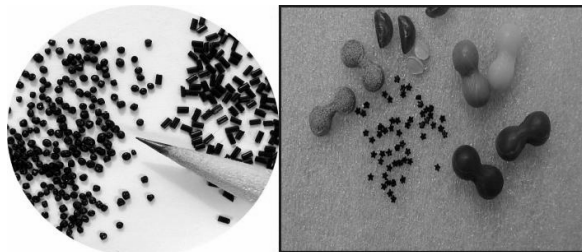
O primeiro e talvez mais importante processo de conformação baseado na extrusão seja a produção de compostos poliméricos na forma de grânulos

41

Sistemas de Granulação



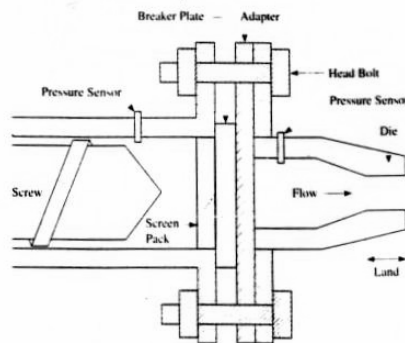
Fonte: Maris e BY Engenharia



42

Princípios dos Processos de Conformação Baseados na Extrusão

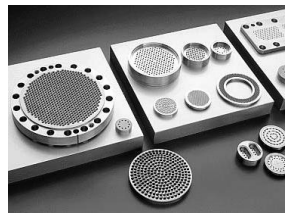
- O **cabeçote**, fixado no **final do canhão** (cilindro) da extrusora, **define** qual é o **produto** a ser conformado através do processo **de extrusão**.



43

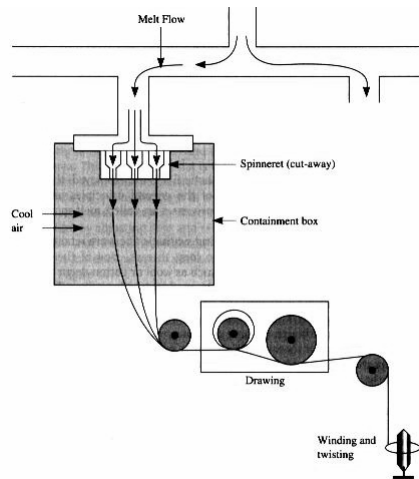
Fibras

- A **matriz**, popularmente conhecida como **fieira** (*spinneret*), se constitui numa **placa circular** com vários furos passantes, cada um também com seção circular semelhante a um **capilar**.



44

Fibras



As fibras podem ser estiradas já durante sua fabricação ou em um processo em separado, após recolhimento.

O nível de estiramento das fibras podem ser classificados como:

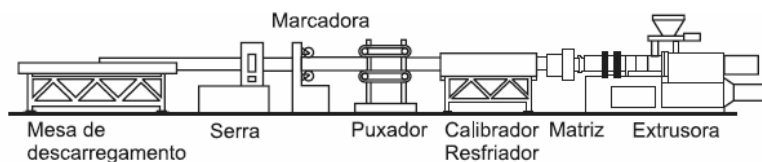
- *as spun* – (baixo nível)
- *partially oriented yarn (POY)* – (alto nível)
- *fully oriented yarn (FOY)* – (elevadíssimo nível).

45

Extrusão de Tubos e Mangueiras

A fabricação de tubos e mangueiras de plásticos é realizada por extrusão, utilizando um tipo adequado de matriz na saída da extrusora.

Tubos *conduites* (tubos corrugados)
 Tubos de alta pressão
 Tubos para irrigação
 Tubos de esgoto
 Tubos para transporte de gases
 Tubos para galerias pluviais, etc.



46

Extrusão de Tubos e Mangueiras

A matriz mais utilizada para a fabricação de tubos é denominada de mandril tipo “spyder”



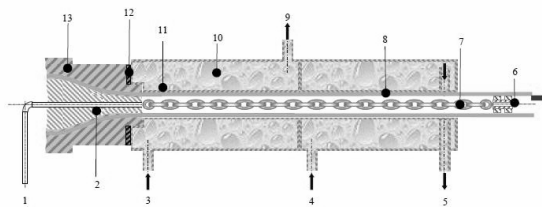
Este tipo de mandril forma frentes de fluxo ou linhas de solda. Se a matriz for suficientemente comprida e mantida a temperatura elevada, o material contido na linha da solda irá fluir por muito tempo juntos. Este comportamento resulta em linhas de solda fortes.

47

Extrusão de Tubos e Mangueiras

A calibração é uma das etapas mais importantes na fabricação de tubos. Este calibração pode ser feita com ar comprimido ou com vácuo.

▪ Calibração com ar comprimido.



O ar comprimido prensa o tubo contra a parede do sistema de calibração.

Figura 1.5 – Calibração externa por ar comprimido.

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| 1 - Entrada de ar comprimido | 8 - Extrudido |
| 2 - Mandril | 9 - Saída de água |
| 3 - Entrada de água | 10 - Água de arrefecimento |
| 4 - Entrada de água | 11 - Calibrador |
| 5 - Saída de água | 12 - Isolamento térmico |
| 6 - Rolha flutuante | 13 - Fieira |
| 7 - Corrente | |

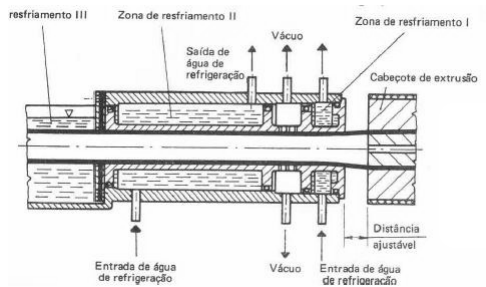
- 0,2 a 1,5 atm – paredes finas

- 6 a 15 atm – paredes grossas

48

Extrusão de Tubos e Canos

▪ Calibração com vácuo

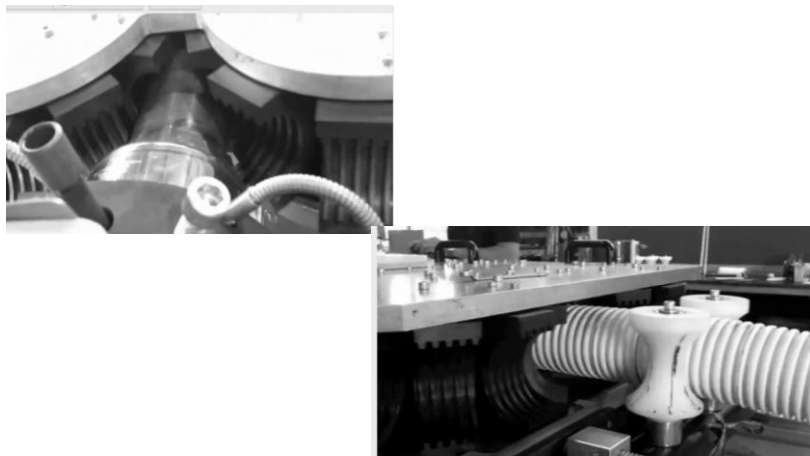


Placa perfurada que faz com que o vácuo “jogue” o material contra a parede de resfriamento. A espessura da parede do tubo não pode ser muito grossa.

49

Extrusão de Tubos e Canos

Tubos corrugados para aplicações como conduítes adquirem sua superfície *enrugada* logo após a saída da matriz, antes de sofrer o resfriamento.

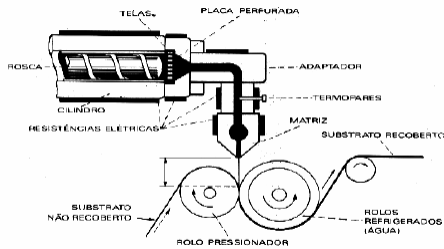


50

Extrusão de Filmes: Planos e Tubulares

Filmes e Chapas Planas:

Chapas: espessura entre 0,2 a 2,5 mm, rígidas e utilizadas em termoformagem



Elevada produtividade e boa uniformidade de espessura (10 a 20 μm).

• Matrizes Planas – Flat Die

Normalmente possuem superfície larga – altas pressões.

Importância em manter a espessura das placas.

51

Princípios dos Processos de Conformação Baseados na Extrusão

As matrizes são posicionadas na saída da extrusora e possuem três regiões funcionais muito importantes:

A seção distribuidora da matriz (*manifold*)

A seção do canal de ajuste (*approach*)

A região de saída da matriz (*lips*)

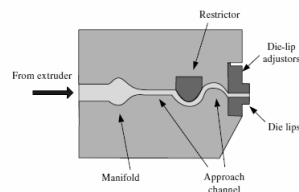
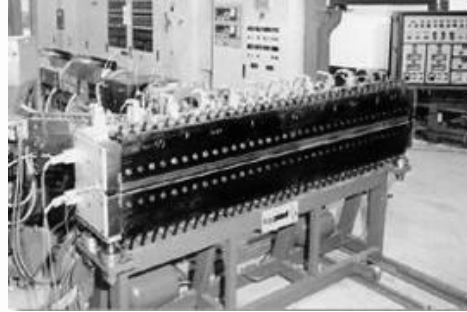
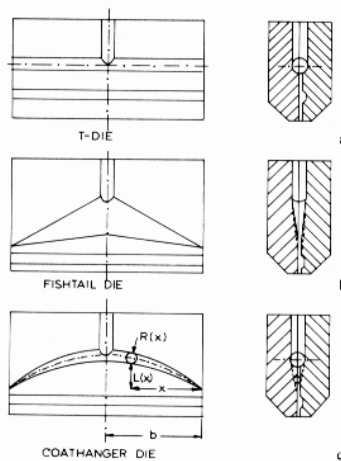


Fig. 12.1 Schematic representation of a sheet die, including manifold, approach channel, and die lip regions. The restrictor bar is incorporated so that the die can be used with different polymers of varying viscosities.

52

Extrusão de Filmes: Planos e Tubulares c

Matrizes Planas – Flat Die

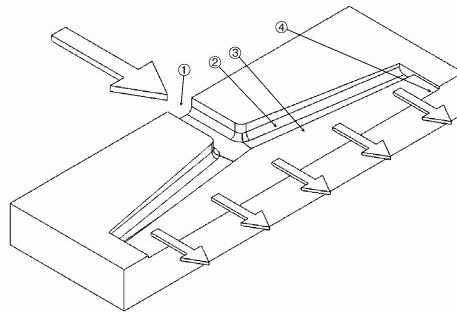


Ao final da matriz encontram-se os lábios da matriz plana que são responsáveis pela espessura final de saída da extrusora e qualidade do extrudado plano fundido

53

Extrusão de Filmes: Planos e Tubulares c

Matrizes Planas – Fishtail Die



1 – Entrada Central;

2 – Manifold (distribuir o fundido);

3 – Island (ao longo do qual proporciona queda uniforme de pressão da entrada até os lábios da matriz);

4 – Lábios da Matriz

54

Extrusão de Filmes: Planos e Tubulares

Matrizes Tubulares

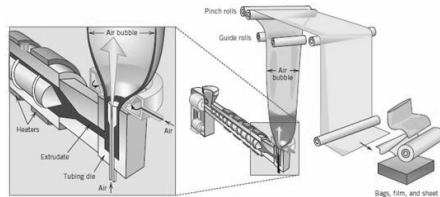
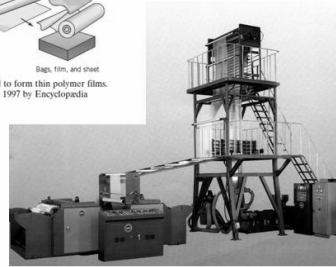


Figure 15.26 Schematic diagram of an apparatus that is used to form thin polymer films. (Reprinted with permission from *Encyclopedia Britannica*, © 1997 by Encyclopedia Britannica, Inc.)

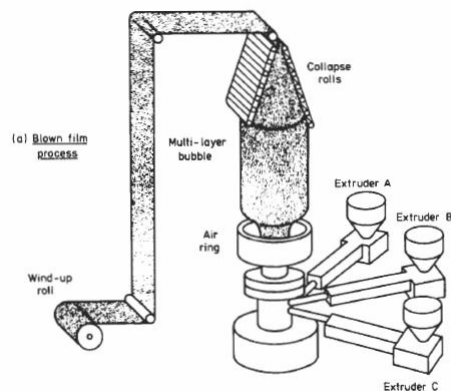


Embora os filmes plásticos possam ser fabricados através de matriz plana, de longe, o processo mais comum é a extrusão de filmes por sopro.

55

Extrusão de Filmes: Planos e Tubulares

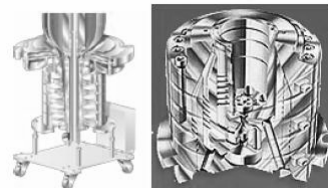
Matrizes Tubulares



Coextrusão

Neste processo de conformação o polímero fundido passa por uma matriz anular, e sai desta matriz como um tubo fino.

Ar comprimido é inserido dentro do tubo fino através do cabeçote e sopra o tubo inflando-o até um diâmetro desejado, daí o termo extrusão por sopro.



56

❑ Embalagens Multicamadas

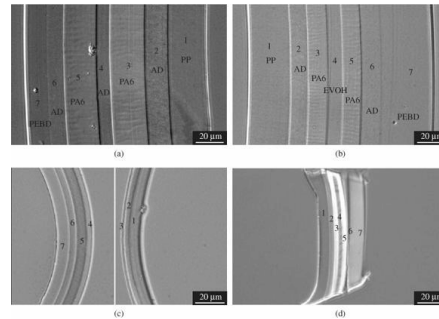
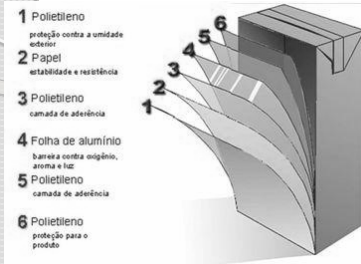


Figura 1. Micrografias óticas para os filmes a) MBP; b) ABP; c) MBT; e d) ABT.

57

Extrusão de Filmes: Planos e Tubulares

Processo Plano

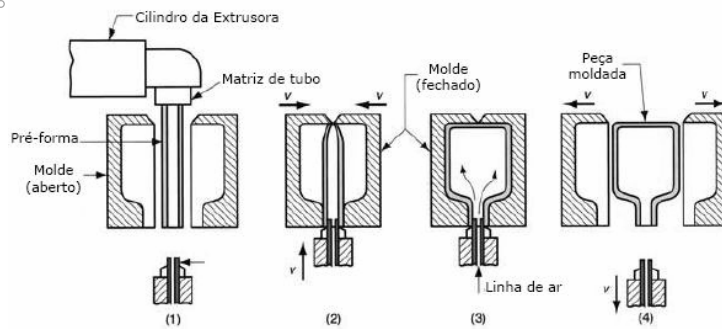
- Produtividade elevada
- Ótima capacidade para produção de filmes com capacidade específica
- ótimo controle operacional
- fácil manutenção mecânica
- variação de espessura de 10%
- Espessura de 15 a 60 μm
- Melhores propriedades de rigidez

Processo Tubular

- Espaço físico reduzido para produção
- Exige altura de instalação do equipamento
- Boa flexibilidade de operação
- Melhor distribuição de espessura
- Filme produzido sem cortes e bordas
- variação de espessura de 5%
- Espessura de 12 a 30 μm
- Balanceamento de resistência em duas direções

58

Extrusão-Moldagem por Sopro



- 1) Obtenção do parison (extrusão).
- 2) Fecha-se o molde, e a parte superior da pré-forma (tubo) é fechada pelo molde.
- 3) Introduz-se ar comprimido no tubo, que o expande enchendo o molde.
- 4) A peça é arrefecida mantendo-se sob pressão do ar, o molde é aberto e a peça é removida.