

*RAUWENDAAL, Chris, **Understanding Polymer Extrusion**. Hanser, 1998;*
*RAUWENDAAL, Chris, **Polymer Extrusion**. Munich: 3ª Ed. Hanser.*

ENTENDENDO A EXTRUSÃO DE POLÍMEROS

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	4
2. EQUIPAMENTOS - DESCRIÇÃO	4
2.1 SISTEMA DE ACIONAMENTO	5
2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	5
2.3 CONJUNTO DE PLASTIFICAÇÃO	5
2.4 SISTEMA DE AQUECIMENTO/RESFRIAMENTO	6
2.5 SISTEMA DE DEGASAGEM	6
2.6 PLACA PERFURADA, TELAS FILTRO E TROCA TELAS	7
2.7 CABEÇOTE E MATRIZ	10
2.8 SISTEMAS DE PÓS-EXTRUSÃO	11
3 EQUIPAMENTOS – FUNCIONAMENTO	14
3.1 TRANSPORTE DO MATERIAL PELA EXTRUSORA	14
3.1.1 ZONA DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS	15
3.1.1.1 SUB-ZONA DE TRANSPORTE GRAVITACIONAL DE SÓLIDOS	17
3.1.1.2 SUB-ZONA DE TRANSPORTE ARQUEMEDIANO DE SÓLIDOS	20
3.1.1.3 SUB-ZONA DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS INDUZIDO PELO ARRASTO	21
3.1.2 ZONA DE PLASTIFICAÇÃO	25
3.1.2.1 SUB-ZONA DE PLASTIFICAÇÃO POR ARRASTE VISCOSO	27
3.1.3 ZONA DE TRANSPORTE DE FUNDIDO	28
3.3 DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DE FLUXO PELA ROSCA	29
3.3.1 FLUXO DE ARRASTO (DRAG FLOW)	29
3.3.2 FLUXO POR DIFERENÇA DE PRESSÃO (PRESSURE FLOW)	29
3.3.3 FLUXO DE VAZAMENTO (DELAY FLOW)	29
3.3.4 FLUXO TOTAL	30
3.4 TRANSPORTE DE FUNDIDO PELA MATRIZ	32
3.5 PONTO OPERACIONAL DE UMA LINHA DE EXTRUSÃO	33
3.5.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA ROSCA NO PONTO DE PRODUÇÃO	34
3.5.2 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA ROSCA NO PONTO DE PRODUÇÃO	34
3.5.3 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA MATRIZ NO PONTO DE PRODUÇÃO	35
3.5.4 INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE DO FUNDIDO NO PONTO DE PRODUÇÃO	36
4 PROJETO DE ROSCA	38
4.1 CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS	38
4.1.1 RESISTÊNCIA TORCIONAL DA ROSCA	38
4.1.2 RESISTÊNCIA DO FILETE DA ROSCA	38
4.1.3 DEFLEXÃO LATERAL DA ROSCA	38
4.1.4 RESSONÂNCIA	39
4.1.5 DISTRIBUIÇÃO NÃO-UNIFORME DA PRESSÃO AO LONGO DA CIRCUNFERÊNCIA DA ROSCA	39
4.2 OTIMIZAÇÃO PARA A PRODUÇÃO	39
4.2.1 OTIMIZAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE SÓLIDO	40
4.2.1.1 O EFEITO DO COEFICIENTE DE FRICÇÃO	40
4.2.1.2 O EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CANAL	41
4.2.1.3 O EFEITO DO ÂNGULO DE HÉLICE	41
4.2.1.4 O EFEITO DO Nº DE FILETES	42
4.2.1.5 O EFEITO DA FOLGA NO FILETE	42
4.2.1.6 O EFEITO DA GEOMETRIA DO FILETE	42
4.2.2 OTIMIZAÇÃO PARA PLASTIFICAÇÃO	43
4.2.2.1 O EFEITO DO ÂNGULO DE HÉLICE	44
4.2.2.2 O EFEITO DE MÚLTIPLOS FILETES	45
4.2.2.3 O EFEITO DA FOLGA NO FILETE	46
4.2.2.4 O EFEITO DA RAZÃO DE COMPRESSÃO (RC)	47
4.2.3 OTIMIZAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE FUNDIDO	48
4.2.4 OTIMIZAÇÃO PARA O CONSUMO DE ENERGIA	48
4.3 TIPOS DE ROSCAS EXTRUSORAS	49
4.3.1 ROSCA PADRÃO UNIVERSAL	49
MODIFICAÇÕES DA ROSCA UNIVERSAL	49
4.3.2 ROSCA COM PASSO VARIÁVEL	49
4.3.3 ROSCA SEM AS SEÇÕES DE DOSAGEM E DE ALIMENTAÇÃO	50
4.3.4 ROSCA DE COMPRESSÃO RÁPIDA	50
4.3.5 ROSCA MULTIFILETADA CONVENCIONAL	50
4.3.6 ROSCA COM FILETE ADICIONAL APENAS NA ZONA DE ALIMENTAÇÃO	51
4.3.7 ROSCAS COM FILETE DE BARREIRA	51
4.3.8 ROSCA TIPO MAILEFFER	51

4.3.9	ROSCA TIPO BARR.....	52
4.3.10	SEÇÕES MISTURADORAS (ou de mistura distributiva).....	52
4.3.11	SEÇÕES CISALHADORAS (ou de mistura dispersiva)	53
4.3.12	ROSCA PARA DEGASAGEM	54
4.3.13	DESVOLATIZAÇÃO EM CASCATA.....	55
4.3.14	EXTRUSORAS DUPLA ROSCA.....	56
4.4	BOMBA DE POLÍMEROS OU DE ENGRENAGENS	49
5	PROJETO DE MATRIZES	61
5.1	CONSIDERAÇÕES BÁSICAS	61
5.2	CONCEITOS ELEMENTARES DO PROJETO DE MATRIZES.....	62
5.3	DIMENSÕES DO EXTRUDADO NA SAÍDA DA MATRIZ.....	64
5.4	ELASTICIDADE DO FUNDIDO – INCHAMENTO DO EXTRUDADO	64
5.5	VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO – EFEITOS DE ESTIRAMENTO	66
5.6	ESTABILIZAÇÃO DA FORMA – EFEITOS TÉRMICOS	67
5.7	INSTABILIDADES NO ESCOAMENTO ATRAVÉS DA MATRIZ: FRATURA DO FUNDIDO, FRATURA SUPERFICIAL E RESSONÂNCIA DO ESTIRAMENTO	67
5.8	EFEITOS DA RESTRIÇÃO, TEMPERATURA DO FUNDIDO E PROJETO DE ROSCA NO FLUXO PELA MATRIZ	69
5.9	TIPOS DE MATRIZES	72
5.9.1	MATRIZES PARA CHAPAS E FILMES PLANOS.....	72
5.9.2	MATRIZES PARA MANGUEIRAS E TUBOS.....	73
5.9.3	MATRIZES PARA FILMES TUBULARES	76
5.9.4	MATRIZES PARA EXTRUSÃO DE PERFIS.....	77
5.9.5	MATRIZES PARA CO-EXTRUSÃO.....	78
6	CALIBRADORES	82

1. INTRODUÇÃO

O processo de extrusão pode ser descrito como o processo em que o polímero fundido (plastificado) é moldado, continuamente, fazendo-o passar através de uma abertura (matriz) que possui a forma aproximada da seção transversal do produto desejado.

Em termos gerais, as funções da extrusora consistem em transportar material sólido, plastificar, homogeneizar e transportar material plastificado, e por fim, bombeá-lo por uma matriz.

Desta forma, a extrusora funciona como uma bomba. Este bombeamento deve promover um fluxo uniforme e constante do polímero até a saída da matriz.

Na matriz o material é conformado bidimensionalmente, conformação esta finalmente fixada pelo sistema de resfriamento. Veja Fig. 1 abaixo.

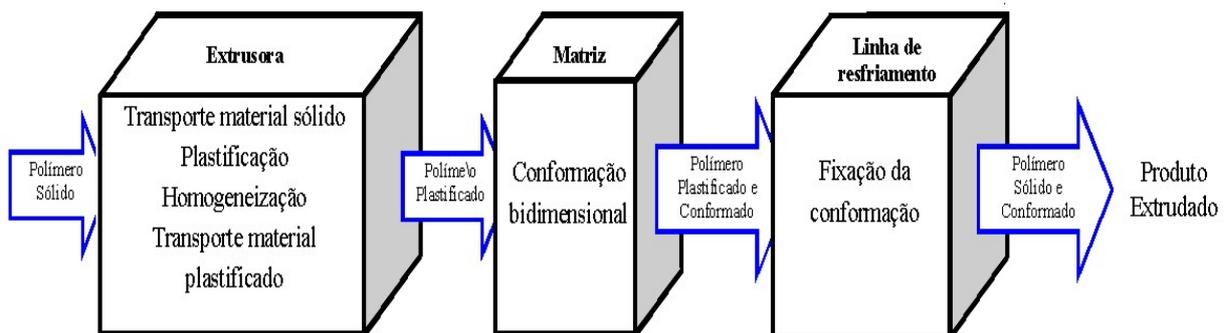


Figura 1. Esquema em blocos do processo de extrusão.

Os produtos transformados pelos processos de extrusão são perfis, capeamento de fios, filamentos, filmes planos e tubulares, tubulações, tarugos, semi-acabados, entre outros.

A otimização do processo de extrusão é atingida somente em situações em que haja um elevado grau de compatibilidade entre:

- o projeto do equipamento (extrusora);
- o projeto da ferramenta (matriz);
- as condições operacionais; e
- as características térmicas e reológicas dos compostos poliméricos.

2 EQUIPAMENTOS - DESCRIÇÃO

Como dito anteriormente, no processo de extrusão o polímero é plastificado, homogeneizado e bombeado pelo sistema de plastificação (conjunto rosca/cilindro) através da matriz com fluxo o mais uniforme e constante possível de forma que o extrudado atinja a linha de resfriamento com o dimensional adequado.

A máquina extrusora de polímero é composta de diversas partes que variam em sofisticação, número de elementos, dimensões e outros detalhes de projeto, conforme o tipo de processo de extrusão, grau de qualidade do produto final e produtividade exigidos.

Os tipos de extrusoras mais comuns são as extrusoras de rosca simples e rosca dupla.

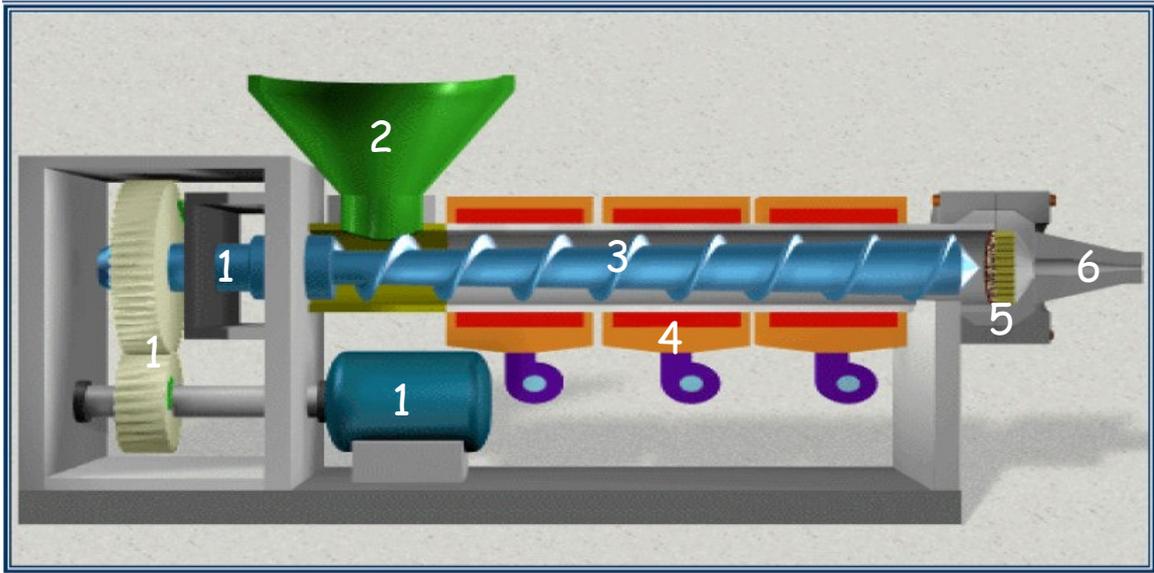


Figura 2. Esquema de uma extrusora monorosca.

2.1 SISTEMA DE ACIONAMENTO

O sistema de acionamento (número 1 na Figura 2) de uma extrusora pode ser simplesmente pensado como um motor elétrico (220, 380 ou 440 V), a transmissão/variação de velocidade (caixa redutora, sistema de polias, inversor de frequência, variador eletromecânico) e o acoplamento à rosca (flange).

2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação ou funil de alimentação (número 2 na Figura 2) pode ser abastecido por processo manual ou automático: transportadores pneumáticos ou esteiras.

O polímero, na forma de grão ou pó, passa do funil de alimentação para a rosca pela ação da gravidade ou de maneira forçada.

No funil de alimentação, podem ser acoplados sistemas de secagem, de dosagem de concentrados de resina/pigmento ou de resina/aditivos conhecidos como *masterbatch*, de dosagem de mais de um tipo de resina (blendas poliméricas) e/ou controle de adição de material reciclado.

2.3 CONJUNTO DE PLASTIFICAÇÃO

O sistema ou conjunto de plastificação formado pelo conjunto rosca plastificadora/cilindro, conforme número 3 na Figura 2.

O cilindro é a parte fixa do conjunto e deve ser fabricado de forma a suportar elevado desgaste por abrasão e por corrosão. São produzidos de diversos tipos de aço, com superfície interna geralmente tratada por nitretação ou bimetálica. A superfície interna deve apresentar elevado coeficiente de atrito quanto ao contato com o polímero, podendo ser desenvolvidas ranhuras em sua superfície. Os materiais mais comuns para a manufatura do cilindro são liga de aço 85:50, liga tipo Nitraloy 135 M (nitretação com íons) que forma uma camada protetora contra corrosão e abrasão. A dureza na superfície interna do cilindro deve estar entre 55 e 72 Rockwell C. e a resistência à tração do aço deve estar entre 360 e 600 MPa. Também são utilizadas ligas Xaloy 800 constituídas de 25% ou mais de partículas de carbeto de tungstênio.

A parte móvel, ou propriamente dita, a rosca, deve ser projetada para a máxima eficiência. Eficiência é tomada como uma função da vazão Q , da sua uniformidade, da durabilidade e da qualidade da plastificação e homogeneização.

Como vimos anteriormente sobre a otimização do processo de extrusão, estas características estão relacionadas ao comportamento de cada tipo de polímero e ao projeto do produto a ser produzido. Portanto, o conjunto de plastificação não pode ser pensado isoladamente do projeto da matriz.

2.4 SISTEMA DE AQUECIMENTO/RESFRIAMENTO

O sistema de aquecimento/resfriamento é normalmente subdividido em zonas de aquecimento (não confundir com zonas da extrusora), cujo número varia conforme a necessidade de diferenciar a temperatura ao longo da rosca (número 4 na Figura 2).

A temperatura é controlada por termostatos e sistemas de aquecimento e de resfriamento. O aquecimento pode ocorrer por resistências elétricas, vapor e óleo. Os sistemas elétricos são os mais utilizados. O resfriamento pode ocorrer por convecção natural, mas quando houver necessidade de maior controle da janela de temperatura de processamento, o controle deve ser tipo convecção forçada (ventoinhas), circulação de água ou óleo por canais no cilindro ou até mesmo, pelo centro da rosca.

Nas extrusoras de rosca simples, a maior parte do calor necessário para o aquecimento do polímero é proveniente do atrito entre o polímero e as superfícies metálicas e, também, devido ao atrito entre as partículas de polímero.

2.5 SISTEMA DE DEGASAGEM

Alguns produtos plásticos liberam gases quando aquecidos. Isto compromete não só a integridade do produto final (porosidade) como a integridade do equipamento devido aos aspectos corrosivos que podem apresentar. Quando a situação for crítica, o projeto do equipamento deve incorporar elementos para a degasagem (Figura 3). A degasagem consiste em um ou mais orifícios (a 3/4 do comprimento L) no cilindro a partir do qual os voláteis, por diferença de pressão ou vácuo podem ser extraídos. Os orifícios podem ser utilizados também para a adição intermediária de componentes como aditivos, cargas, componentes reativos, etc.

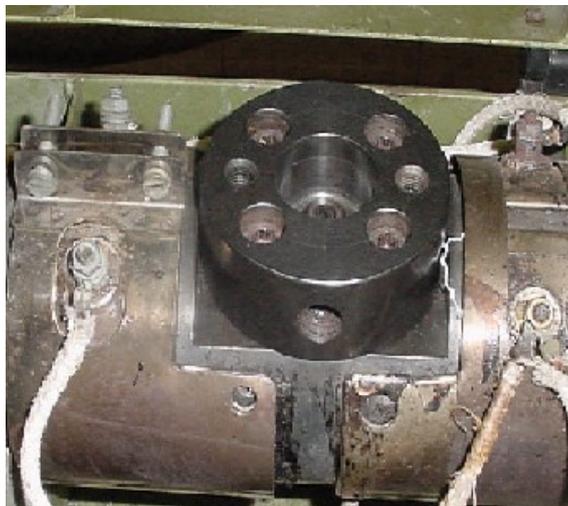


Figura 3. Fotografia de sistema de degasagem.

2.6 PLACA PERFURADA, TELAS FILTRO E TROCA TELAS

Entre o conjunto de plastificação e a matriz há a placa perfurada ou crivo, ou placa de quebra fluxo (número 5 da Figura 2). A placa perfurada consiste de um disco de aço com orifícios de diâmetro entre 3 a 5 mm (Figura 4) e deve ser projetada sem pontos de estagnação (Figura 5). As funções desta placa são a de aumentar a pressão de contra-fluxo (ou retorno), quebrar o fluxo rotacional e suportar as telas de filtragem, que retêm possíveis impurezas.



Figura 4. Fotografia de uma placa perfurada.

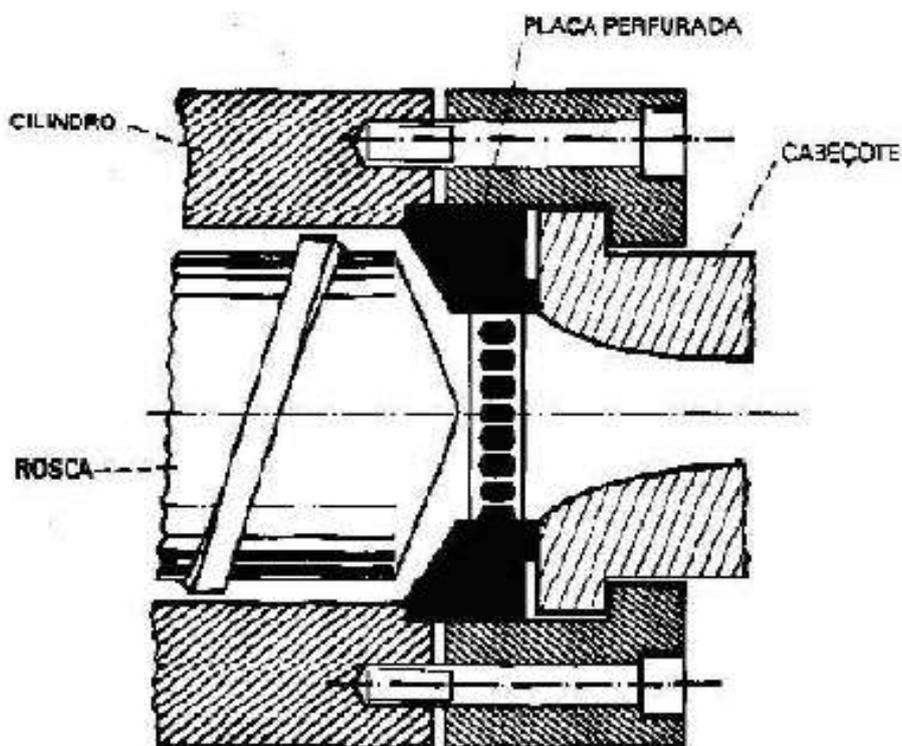


Figura 5. Representação esquemática da posição da placa perfurada.

ºO sistema de filtragem da massa polimérica consiste em uma malha metálica disponível em vários tamanhos de furos (unidade de medida em *mesh* – nº furos/ pol²) que agem como filtro para retirar do material fundido as partículas de material não plastificado e outros tipos de impurezas. Em geral aumentam a pressão de contra-fluxo dependendo do seu tamanho. Em geral, o sistema de filtragem consiste em um

sanduíche de telas com aberturas diferentes (Figura 6), onde as externas são as que apresentam malhas mais abertas (menores *mesh*), enquanto que as internas são as mais fechadas (maiores *mesh*). Podem, ainda, incluir um anel de vedação (Figura 7).

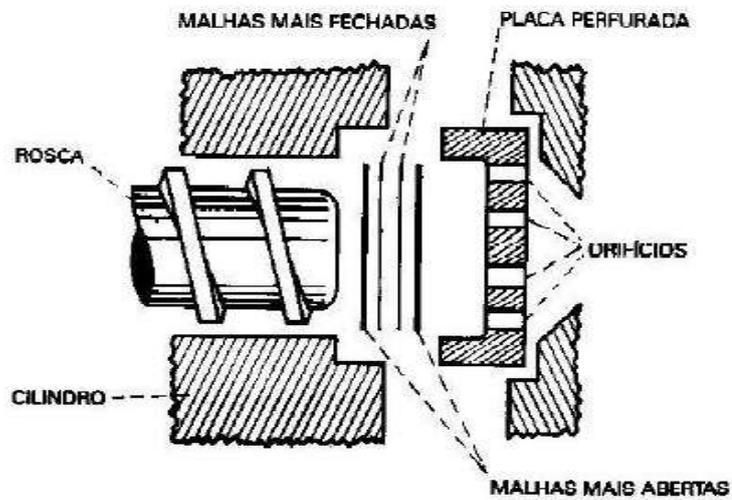


Figura 6. Representação esquemática da posição das telas filtro.

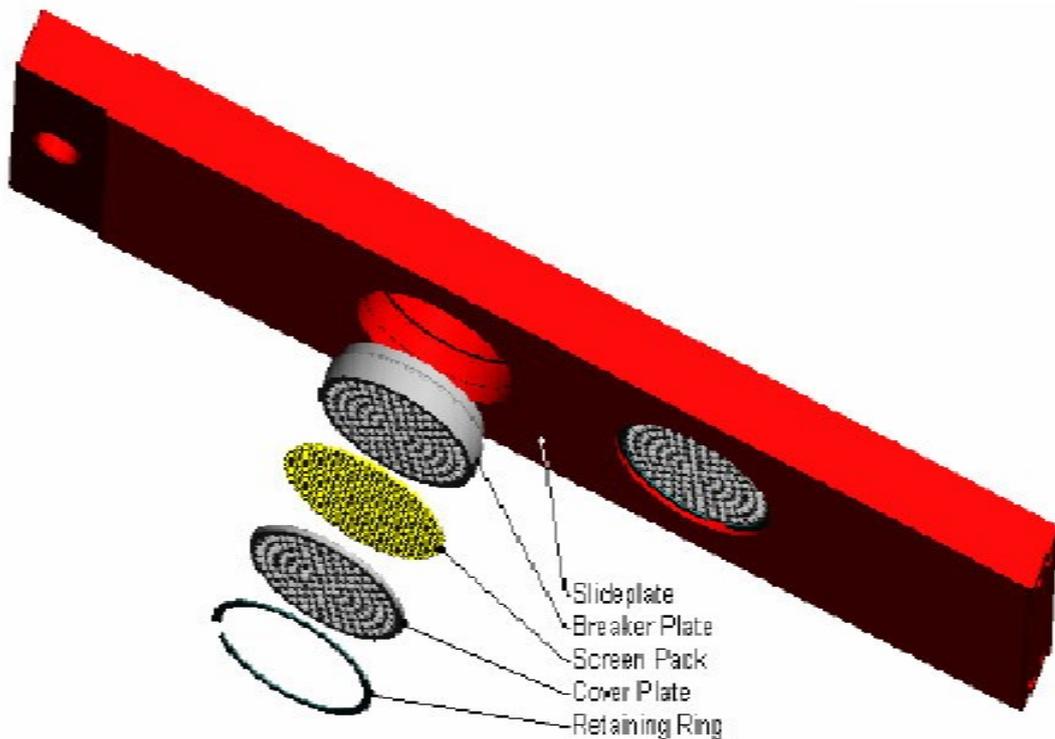


Figura 7. Representação esquemática da posição das telas filtro com anel de vedação.

Quando a tecnologia do equipamento incluir um sistema de medição e controle do processo pela pressão, a posição do transdutor de pressão e do manômetro deve ser antes do sistema de telas filtro, conforme Figura 8.

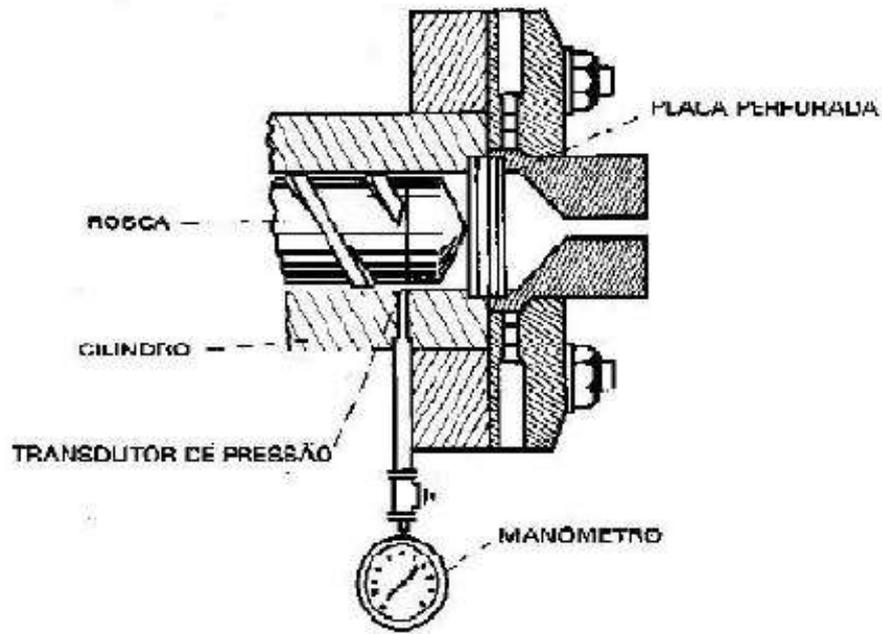


Figura 8. Representação esquemática do sistema de medição e controle da pressão.

Há extrusoras em que o sistema de troca telas não permite manter o fluxo contínuo (Figura 9).

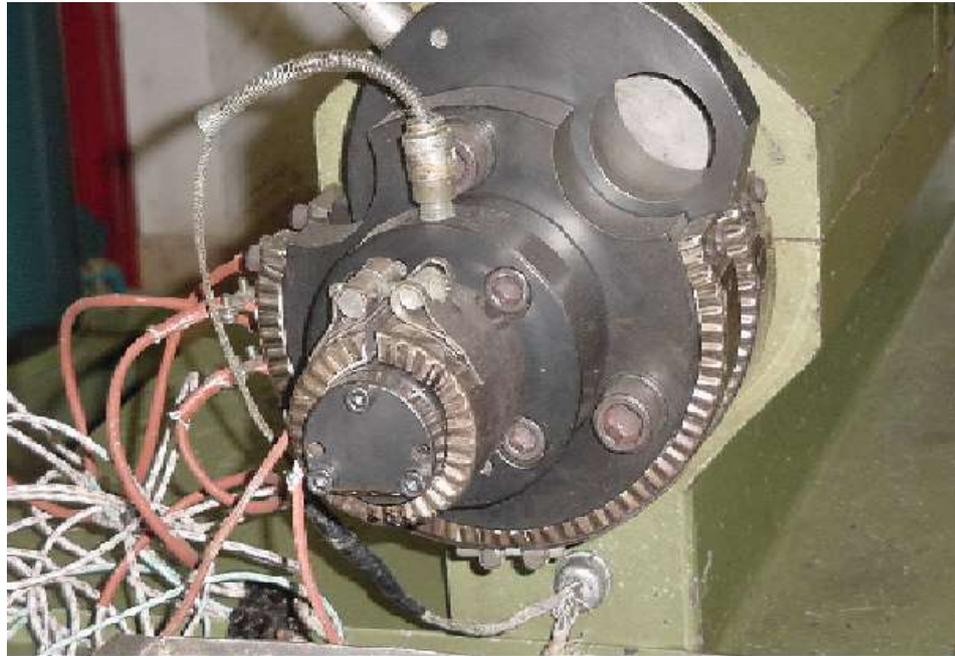


Figura 9. Fotografia de troca telas descontínuo.

Extrusoras mais modernas possuem sistemas de troca telas mais eficientes, que apresentam a troca de forma contínua, sem interrupção do processo, conforme Figura 10.

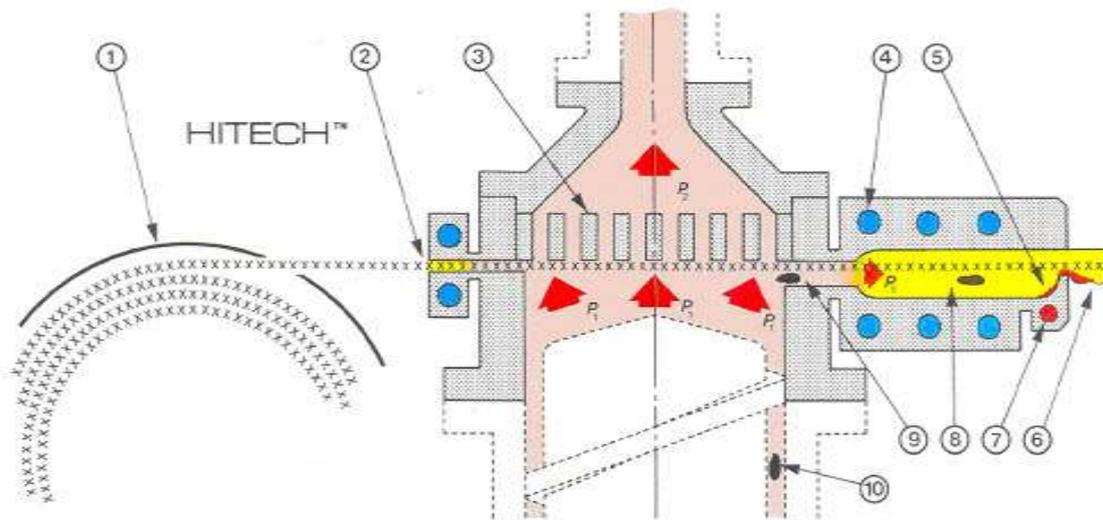


Figura 10. Representação esquemática de troca telas contínuo.

2.7 CABEÇOTE E MATRIZ

Após a placa perfurada há o sistema composto pelo cabeçote e pela matriz (número 6 da Figura 2). Cabeçote é o ferramental que fica após a rosca e a matriz é a extremidade final do cabeçote que tem como função dar forma à massa polimérica. O cabeçote pode demandar um projeto simples como aquele apresentado pelas maiorias das extrusoras de reciclagem ou complexos como os apresentados por sistemas de extrusão de filmes multicamadas tubulares, planos, tubulações, etc., conforme Figuras 11, e 12.

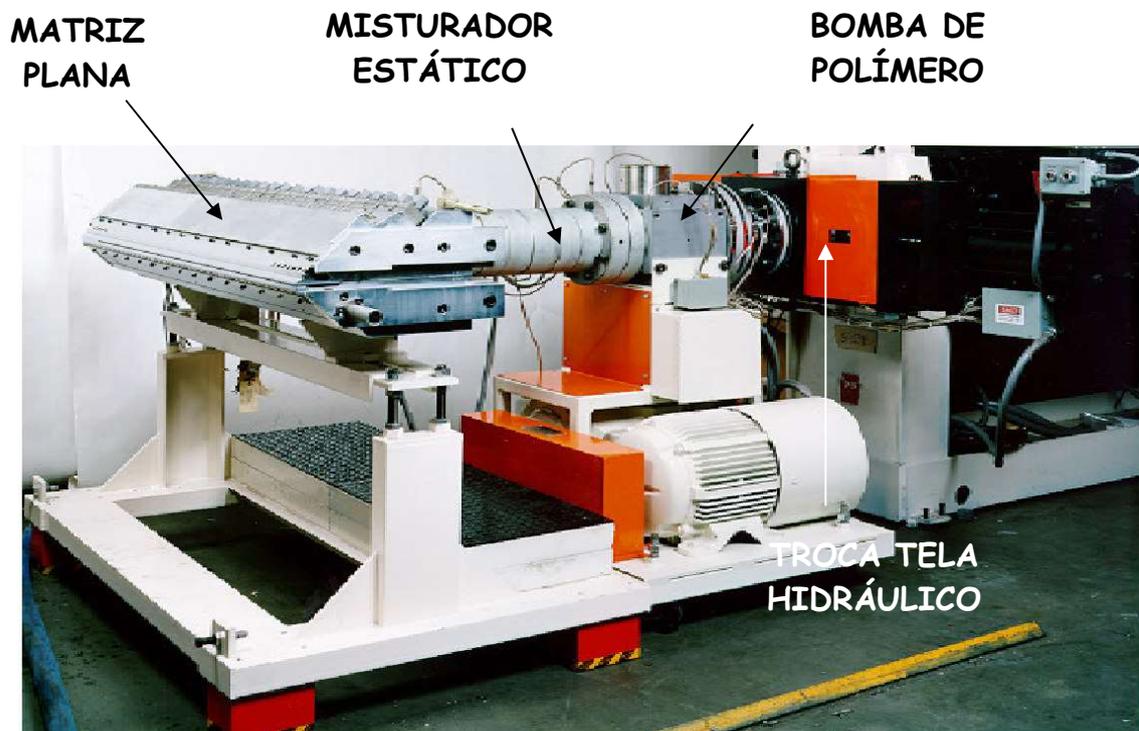


Figura 11. Matriz de filme plano.

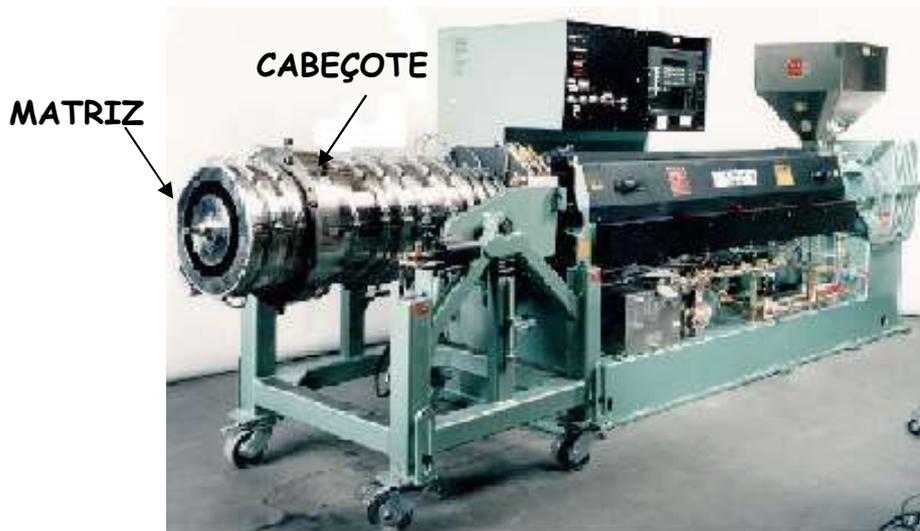


Figura 12. Matriz e cabeçote para tubulações.

2.8 SISTEMAS DE PÓS-EXTRUSÃO

Os sistemas de pós-extrusão apresentam níveis de complexidades inerentes ao projeto do produto e à qualidade exigida. São operações encontradas nos sistemas de pós-extrusão: calibração, normalização, estiragem, corte, bobinamento. Abaixo, as Figuras 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

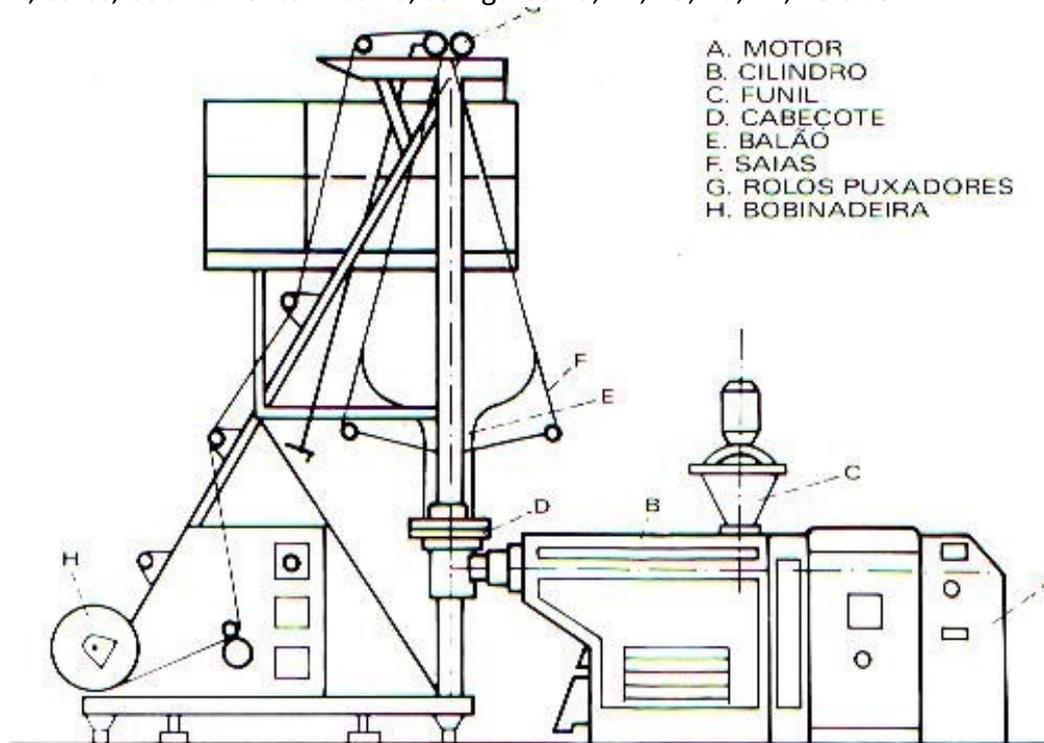


Figura 13 . Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de filmes tubulares.

- A - extrusora
- B - cabeçote
- C - banho de resfriamento
- D - torre para eliminação de água
- E - corte das fitas
- F - estufa de estiragem
- G - estufa de normalização
- H - bobinadeiras
- I - aspirador de rebarbas

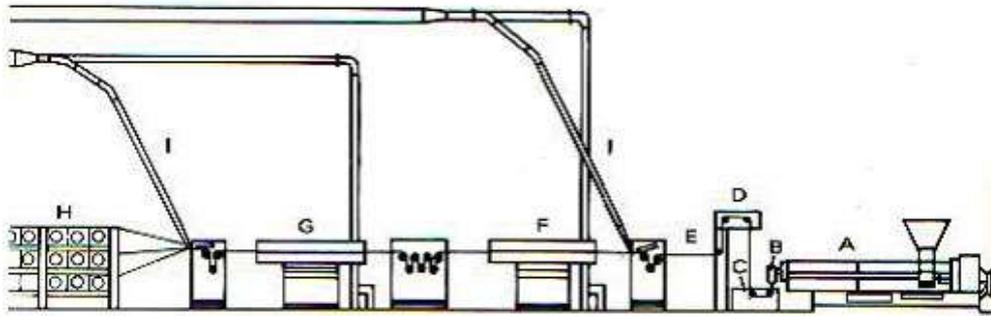


Figura 14 . Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de ráfia.

- A - extrusora
- B - cabeçote
- C - banho de resfriamento
- D - banheira de estiragem
- E - estufa de normalização
- F - bobinadeiras
- G - aspirador de rebarbas

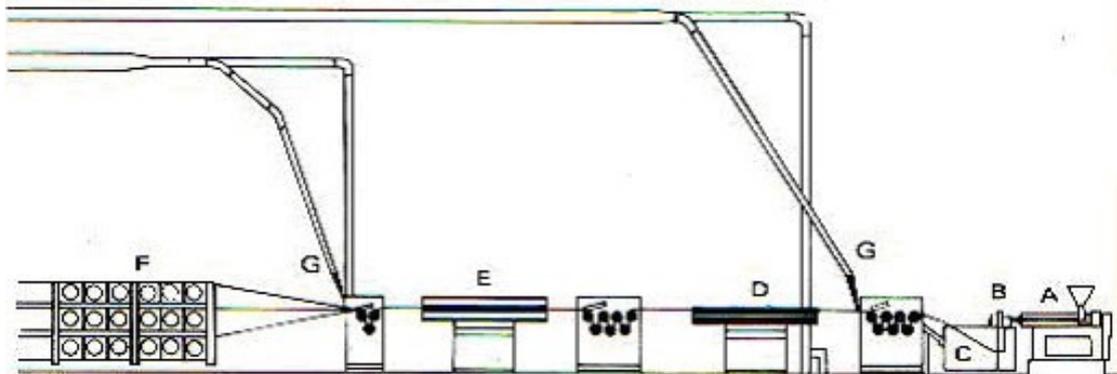


Figura 15 . Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de monofilamentos.

- A - extrusora
- B - calibrador a vácuo
- C - banheira de resfriamento
- D - puxador
- E - bobinador
- F - cabeçote/matriz

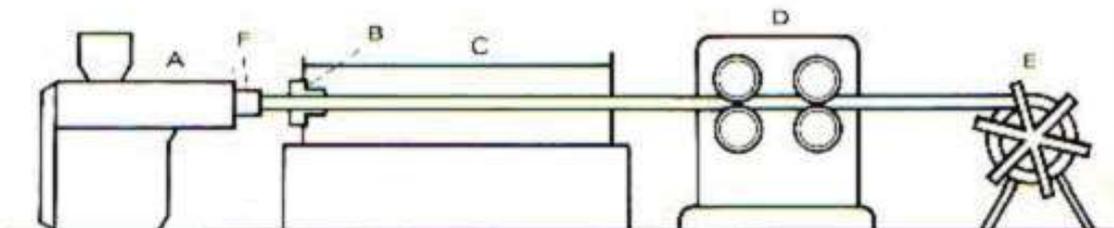


Figura 16 . Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de mangueiras.

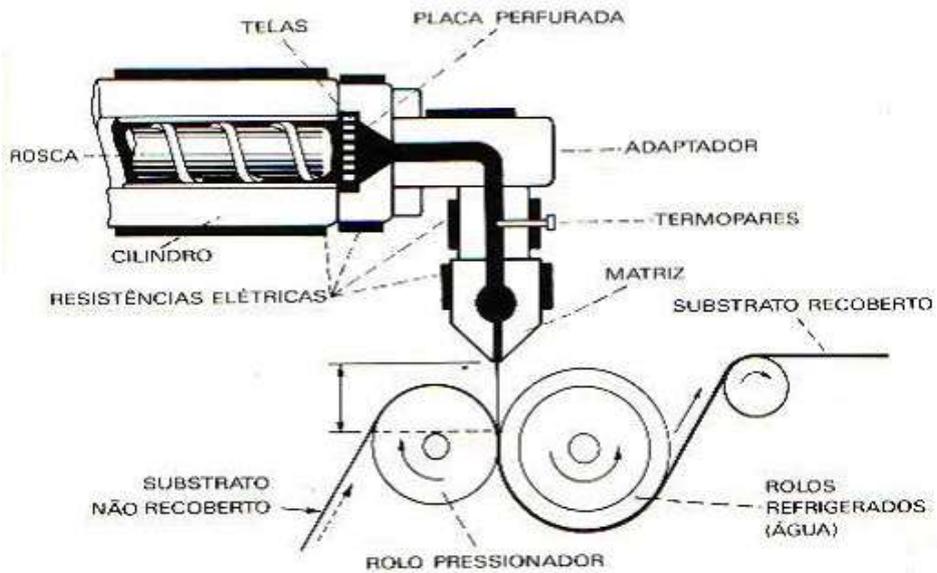


Figura 17. Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para extrusão de laminados.

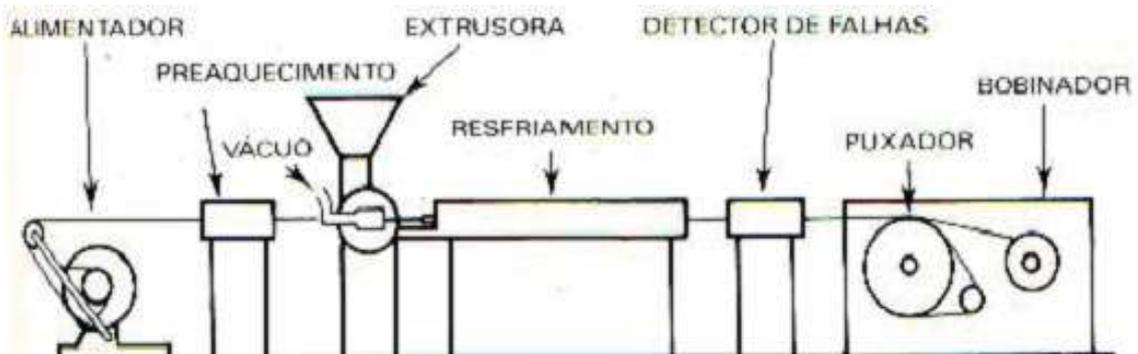


Figura 18 . Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de fios e cabos.

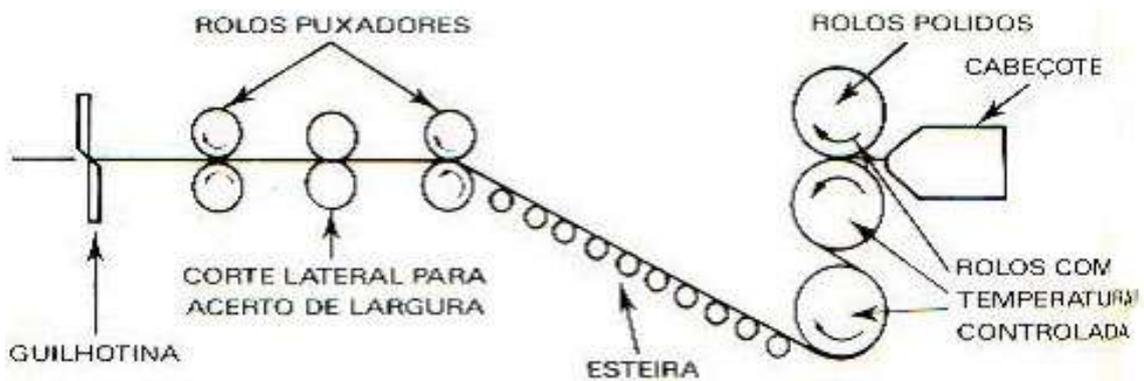


Figura 19 . Representação esquemática de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de chapas finas.

3 EQUIPAMENTOS – FUNCIONAMENTO

3.1 TRANSPORTE DO MATERIAL PELA EXTRUSORA

O perfil geométrico das roscas para a extrusão é um aspecto interessante, porém tecnicamente complexo e recebe uma considerável quantidade de estudo, pois envolve o conhecimento das propriedades térmicas e reológicas do polímero a ser processado.

Cada polímero apresenta comportamento térmico e reológico diferente. Dessa forma, os perfis das roscas são otimizados para um polímero particular a ser extrudado.

Basicamente, a rosca é dividida em três seções geométricas: alimentação, compressão e dosagem (Figura 20).

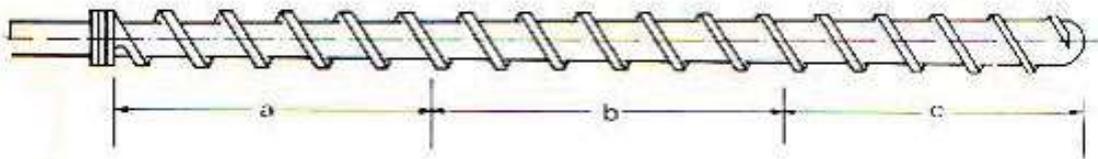


Figura 20 . Representação esquemática de uma rosca típica.

a) Seção de alimentação: promove o transporte de sólidos, propicia o início da plastificação do polímero. Para análise desta seção deve-se envolver a combinação de mecânica de fluidos e sólidos, além da transferência de calor.

b) Seção de compressão: promove a compactação, a plastificação e a mistura do polímero plastificado, transportando-o praticamente homogêneo para a seção de dosagem.

c) Seção de dosagem: propicia a homogeneização da massa plastificada transportando-a para o sistema cabeçote/matriz. Consistem em aplicação dos princípios da reologia e está intimamente interligado ao projeto da matriz. O material ao deixar esta seção deve estar homogêneo quanto à composição e quanto à temperatura e com vazão a mais constante possível.

A **seção** é um **lugar geométrico** na rosca e é delimitada no momento do projeto e da confecção da mesma. Por outro lado, **zona** é o termo utilizado para definir o processo (**fenômeno**) ou etapa do processo que está ocorrendo no interior do sistema de plastificação.

A principal diferença entre zonas funcionais e seções geométricas é que a exata localização das zonas funcionais depende das condições de processamento, da geometria da rosca, das propriedades do polímero e da matriz. Por outro lado, a localização exata das seções depende apenas da geometria da rosca. As zonas não são discretas e por alguma extensão se sobrepõem. Suas condições de contorno podem deslocar-se quando as propriedades do polímero ou as condições mudam. Pode-se dizer que não há correspondência direta entre zonas e seções.

Mesmo a uma velocidade rotacional constante da rosca, a vazão de uma extrusora apresenta variabilidade. As variáveis independentes que influenciam na variabilidade da vazão podem ser agrupadas a três grupos distintos: variáveis relacionadas ao material processado, variáveis de processo e variáveis do projeto rosca/matriz.

Quanto às variáveis do material a ser processado estão aquelas relacionadas ao comportamento térmico e reológico do polímero. Quanto às variáveis de processamento estão as janelas de temperatura, de pressão e de taxa de deformação as quais o material está sendo submetido. Quanto ao projeto de rosca, devem ser considerados aspectos como razão L/D (comprimento/diâmetro), a largura e a inclinação do

filete, variação do passo da rosca, a adição de filetes de barreira, seções de mistura distributiva e dispersiva, etc.

Para melhor compreendermos este conjunto de variáveis independentes, há a necessidade de compreendermos os principais fenômenos que ocorrem tanto na rosca plastificadora como na matriz, durante o fluxo de material polimérico.

Zaradskly (1978) desenvolveu um modelo matemático com as seguintes divisões funcionais da rosca:

- zona de transporte de sólidos;
- zona de retorno;
- zona de fusão;
- zona de transporte de fundido.

De forma a estudar os fenômenos desenvolvidos na rosca e no funil, as zonas acima serão condensadas em três zonas funcionais:

- 1) zona de transporte de sólidos;
- 2) zona de plastificação (fusão)
- 3) zona de transporte de fundido.

Nestas zonas, diferentes fases físicas do material, podem ser encontradas. Inicialmente, todo o material permanece sólido. Após, ocorre o transporte de sólido, seguido pela coexistência do transporte de sólido e de plastificado, por fim, transporte de fundido.

3.1.1 ZONA DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS

Pode-se dividir a zona de transporte de sólido em três sub-zonas distintas:

- a sub-zona de transporte gravitacional de sólido no funil de alimentação,
- a sub-zona de transporte arquimediano de sólidos na garganta da seção de alimentação da rosca, e
- a sub-zona de transporte de sólido induzido por arrasto na seção de alimentação após a garganta.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS QUE INFLUENCIAM SEU ESCOAMENTO NA FORMA DE PARTÍCULAS SÓLIDAS NO FUNIL DE ALIMENTAÇÃO E NA ROSCA PLASTIFICADORA:

Antes de estudarmos os fenômenos que ocorrem na zona de transporte faz-se necessário compreender algumas propriedades que influenciam o escoamento de material particulado. Para serem processados por extrusão, os polímeros apresentam-se na forma de grãos ou em pó. Nesta forma os materiais apresentam ar ocluso em seus interstícios, definindo uma densidade aparente¹ que varia de acordo com a quantidade de ar.

Materiais com baixa densidade aparente (ρ aparente $< 0,2 \text{ g/cm}^3$) tendem a apresentar problemas de transporte do material particulado tanto no funil de alimentação como na seção de alimentação da rosca.

Materiais com partículas, cuja geometria é irregular, tendem a apresentar baixa densidade aparente, por exemplo, fragmentos de fibras ou de filmes. A densidade aparente à pressão atmosférica é uma informação utilizada, mas limitada. É muito importante conhecer como ocorrem as mudanças na densidade aparente com a pressão porque a compressibilidade do material determina, numa larga extensão, o comportamento de transporte do sólido.

A densidade aparente sofre mudanças com alterações da pressão exercida sobre o material devido à capacidade de compactação dos particulados. A compactação ocorre pelo arranjo e deformação das partículas, sendo que a diferença de comportamento durante esta compactação é algumas vezes referida como compressibilidade por rearranjo.

¹ (Densidade aparente é utilizada quando não existe no mesmo volume um único material. Dessa maneira, determina-se a densidade média que depende da quantidade de cada componente do sistema.)

A compressibilidade por rearranjo depende de propriedades físicas superficiais as quais estão relacionadas às forças coesivas entre as partículas. A compressibilidade por rearranjo do material é o quanto varia a sua densidade aparente em função de uma pressão aplicada. Ela determina o comportamento do material particulado durante o seu escoamento.

Quando a compressibilidade por rearranjo de um material é grande, ele tende a compactar-se durante o armazenamento e isto pode causar problemas de descarga.

O limite entre fluxo livre e fluxo não-livre ocorre à compressibilidade por rearranjo de aproximadamente 20%. Materiais que fluem livremente são denominados de materiais não coesivos, enquanto que materiais que não fluem livremente são denominados como materiais coesivos. Entretanto, para efeito de aplicabilidade prática, materiais que apresentam compressibilidade por rearranjo inferior a 40% (e acima de 20%, portanto coesivos) desenvolvem boa fluidez. Com valores acima de 40%, o material terá forte tendência para empacotar no funil de alimentação e a probabilidade de haver problemas de descarga é elevada².

Outro fenômeno importante para descrever o processo de transporte de sólidos é o da fricção. A fricção é a resistência tangencial que se opõe ao deslizamento de um sólido em relação ao outro e pode ser mensurado através do coeficiente de fricção.

O coeficiente de fricção, portanto, é o parâmetro que caracteriza a resistência ao deslizamento entre duas superfícies quaisquer e seu valor está relacionado com a rugosidade superficial do material e a temperatura.

O coeficiente de fricção é calculado pela razão entre a tensão de cisalhamento na interface e a tensão normal à interface.

O coeficiente de fricção está relacionado com a força necessária para dar início ao deslizamento (coeficiente estático) e para manter o deslizamento (coeficiente dinâmico ou cinético).

Quando o fenômeno a ser analisado é o de transporte de particulados há duas situações a serem analisadas: o coeficiente de fricção, interno e o externo.

O coeficiente de fricção interno é uma medida da resistência existente quando uma camada de partículas desliza sobre outra camada de partículas do mesmo material.

O coeficiente de fricção estático (f^*) é dado por:

$$f^* = \tau^{*ij} / \tau_{ij}$$

onde:

τ^{*ij} é a tensão de cisalhamento máxima um pouco antes do deslizamento inicial e,

τ_{ij} é a tensão normal na interface.

O coeficiente de fricção dinâmico é dado por:

$$f = \tau_{ij} / \tau_{ii}$$

onde:

τ_{ij} é a tensão de cisalhamento durante o deslizamento.

O coeficiente de fricção externo é uma medida da resistência existente na interface entre as partículas e as paredes de um material de construção diferente.

² (Como um teste prático, pressiona-se o polímero com a mão e a condição posterior formada, se

- indicar que a forma final não se manteve, o material é de baixa compressibilidade;
- indicar que a forma final se manteve, mas pode ser facilmente quebrada, o material é de moderada compressibilidade;
- indicar que a forma final se manteve e o material não quebra facilmente, é bastante compressivo).

3.1.1.1 SUB-ZONA DE TRANSPORTE GRAVITACIONAL DE SÓLIDOS

O transporte de material pela ação gravitacional no funil (sub-zona de transporte gravitacional de sólido) requer que o mesmo esteja na forma particulada.

A sub-zona de transporte gravitacional de sólidos inicia no funil de alimentação e termina na garganta de alimentação. O material é transportado até o início da rosca através da ação da força gravitacional.

Normalmente, o cilindro é resfriado na garganta de alimentação para impedir a fusão do polímero nesta região.

Muitos funis de alimentação têm seção superior cilíndrica e, na parte inferior, seção cônica conforme a Figura 21 abaixo.

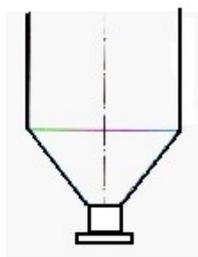


Figura 21. Típico funil de alimentação de extrusoras com seção cilíndrica e cônica.

O fluxo através do funil de alimentação pode ser considerado como um fluxo friccional³, isto é, as partículas então em contato constante entre si e a transferência de *momentum* pelas colisões entre si são negligenciáveis.

O fluxo do material depende da seção do funil de alimentação, conforme Figura 22. O fluxo na seção cilíndrica do funil de alimentação tende a ser fluxo pistonado (*plug flow*).

A zona de fluxo pistonado é limitada inferiormente pela zona de ruptura. A zona de ruptura é situada aproximadamente na seção de transição cilindro/cônica. Esta zona é caracterizada pela intensa deformação relativa do material granular.

Abaixo da zona de ruptura, junto à seção cônica, podem ocorrer regiões com fluxo pistonado limitados pelas paredes do funil e pela zona de ruptura.

Finalmente, na parte inferior da seção cônica, o fluxo das partículas ocorre livremente, a qual é referida como zona de fluxo livre ou de queda livre.

³ Na análise do fluxo de material granular, distingue-se dois tipos de fluxos. O primeiro, denominado de fluxo friccional lento, ocorre quando as partículas apresentam contato contínuo uma com as outras, onde as forças internas resultam da fricção coulômbica entre as partículas em contato. O segundo, conhecido como fluxo viscoso ou fluxo muito rápido, ocorre quando as partículas não estão em contato constante com as partículas de sua vizinhança. Neste tipo de fluxo, as forças internas aumentam devido a transferência de *momentum* durante as colisões entre as partículas. Geralmente o primeiro ocorre no fluxo de sólidos e o segundo no fluxo de líquidos e gases.

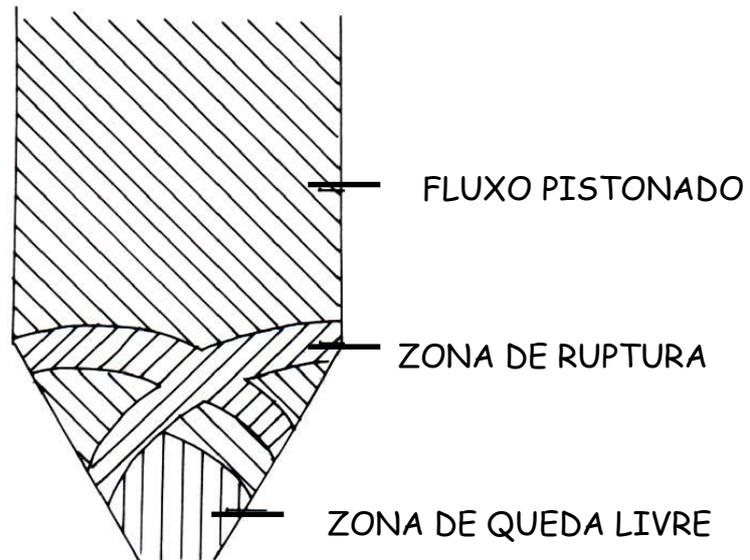


Figura 22. Vários regimes de fluxo em um funil de alimentação de particulados.

No fluxo do material através do funil são geralmente distinguidos dois tipos de fluxo: fluxo em massa e fluxo em tubo Figura 23 (a) e (c), respectivamente.

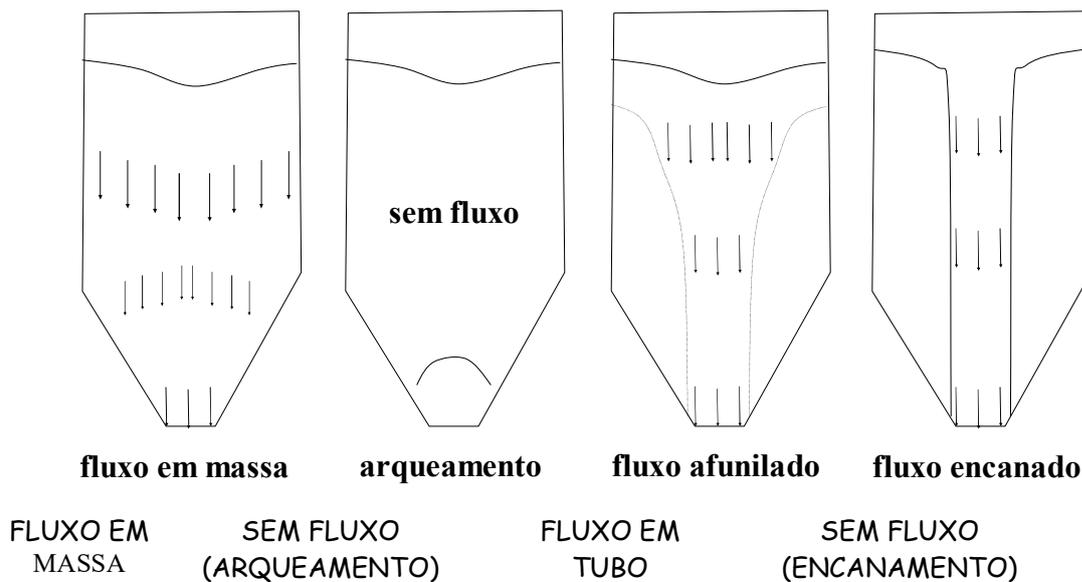


Figura 23. (a) fluxo em massa, (b) arqueamento), (c) fluxo em tubo e (d) encanamento

No fluxo em massa, todas as partículas se movem para baixo na direção da saída do funil. Não há regiões de estagnação de material. No fluxo em tubo (canal), portanto, há região de estagnação ($v = 0$). Um anel de material estagnado é formado. O material desta região de estagnação é capaz de suportar o material que fica acima, permitindo a formação de um canal vazio.

Um problema comum no fluxo em massa é o efeito de arqueamento (*arching*), Figura 23 (b).

No fluxo em tubo, as paredes deste canal de fluxo são formadas por partículas estacionárias do material. Este problema é chamado encanamento (*piping*).

Materiais altamente compressíveis tem uma forte tendência ao arqueamento e ao encanamento, portanto são problemas de fluxo tipicamente de partículas sólidas coesivas (fluxo não-livre).

Para solucionar estes problemas o funil de alimentação pode ser equipado com um sistema que permite sua vibração mecânica contínua ou o uso de unidades de dosagem, através de sistemas de

alimentação forçada, com uma rosca dosadora dentro do funil, controlando a velocidade de alimentação da extrusora e permitindo a uniformidade de fluxo na alimentação (Figura 24).

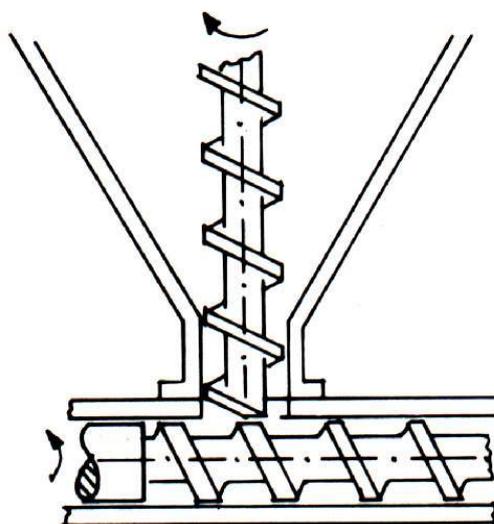


Figura 24. Sistema de alimentação forçada.

Quando a densidade aparente do granulado é baixa a taxa de fluxo em massa também será baixa. Então o transporte de sólidos pode não ser suficiente para suprir as zonas seguintes com material, ou ainda, insuficiente para que haja compressão adequada na seção de compressão, comprometendo a vazão.

O processamento de material reciclado é ainda mais difícil de processar devido a sua baixa densidade aparente e heterogeneidade quanto à forma e tamanho dos grânulos. Desta forma, estes materiais costumam apresentar problemas no transporte do sólido no funil de alimentação ou na seção de alimentação da extrusora. Uma das soluções é utilizar um percentual de reciclagem com material virgem, que não venha a comprometer seriamente a vazão.

Outra alternativa, para minimizar os efeitos negativos da baixa densidade aparente dos materiais, consiste em desenvolver projetos de rosca cuja alimentação seja projetada de tal forma que haja um superdimensionamento desta seção.

O uso de equipamento vibratório no funil pode ser útil, mas em função da irregularidade do tamanho e da forma das partículas, o material reciclado é mais resistente aos efeitos da vibração.

A faixa de partículas poliméricas usadas em extrusão é muito larga variando de 1 micrômetro até 10 milímetros. A Figura 25 a seguir mostra a nomenclatura geralmente usada para descrever os sólidos particulados.

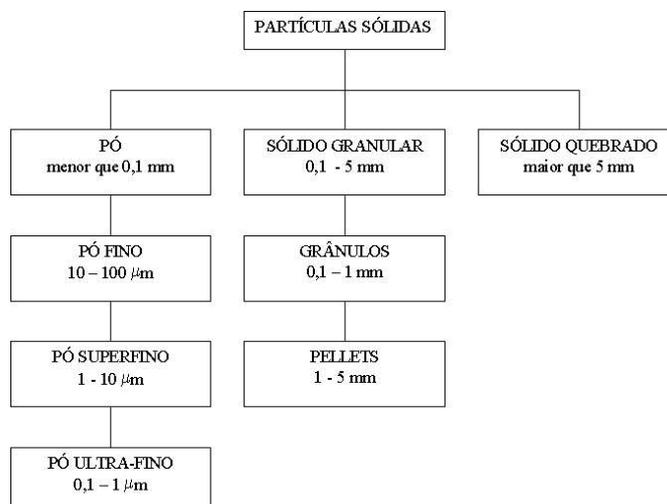


Figura 25. Classificação das partículas sólidas conforme as dimensões.

A facilidade de transporte de sólidos também é determinada pelo tamanho e pela forma das partículas.

Os *pellets* apresentam geralmente fluxo livre (compressibilidade menor do que aproximadamente 20%) e não têm forte tendência a aprisionar ar. De um ponto de vista do transporte de sólidos, materiais na forma de *pellets* são os mais fáceis de trabalhar.

Os grânulos podem apresentar fluxo livre e semi-livre e têm muita probabilidade de prender ar. Grânulos semi-livres podem requerer vibração no funil para assegurar fluxo constante.

Os pós tendem a ser coesivos e também tendem a prender o ar. Seu processamento requer cuidados especiais. O grau de dificuldade na extrusão de pós, geralmente, aumenta com a diminuição do tamanho das partículas.

Os sólidos “quebrados” (fragmentos de filmes, fibras e *flakes*) apresentam forma irregular e a densidade aparente é, freqüentemente, muito baixa. Este tipo de sólido particulado é problemático do ponto de vista do transporte de sólidos. Isto ocorre porque as partículas resistem ao fluxo mesmo sob agitação. O surgimento de carga estática pode também ocorrer e, portanto, poderá ser necessário, algumas vezes, utilizar um eliminador de carga estática.

3.1.1.2 SUB-ZONA DE TRANSPORTE ARQUEMEDIANO DE SÓLIDOS

Quando o polímero sólido particulado entra no canal da rosca, o mecanismo de fluxo induzido pela gravidade praticamente é interrompido. Na maioria das extrusoras, o cilindro e a rosca são colocados na posição horizontal e o papel da gravidade perde importância.

Logo após entrarem no canal da rosca as partículas do polímero passam a apresentar uma formação compacta: o leito sólido. Desta maneira, os sólidos passam a se mover em fluxo pistonado, ou seja, em qualquer seção transversal do leito sólido todas as partículas movem-se com a mesma velocidade.

Esta compactação dos sólidos particulados em um leito sólido somente é obtida quando ocorre geração de pressão suficiente no canal da rosca. Se não é gerada pressão suficiente no canal, os sólidos não formam o leito sólido. Neste caso não ocorre o fluxo pistonado e haverá deformação interna do material sólido. Como resultado, o processo de transporte de sólidos será menos estacionário em comparação ao fluxo pistonado.

Este tipo de fluxo é chamado fluxo por transporte arquimediano, conforme ilustrado nas Figuras 26 e 27.



Figura 26. Princípio do transporte arquimediano.

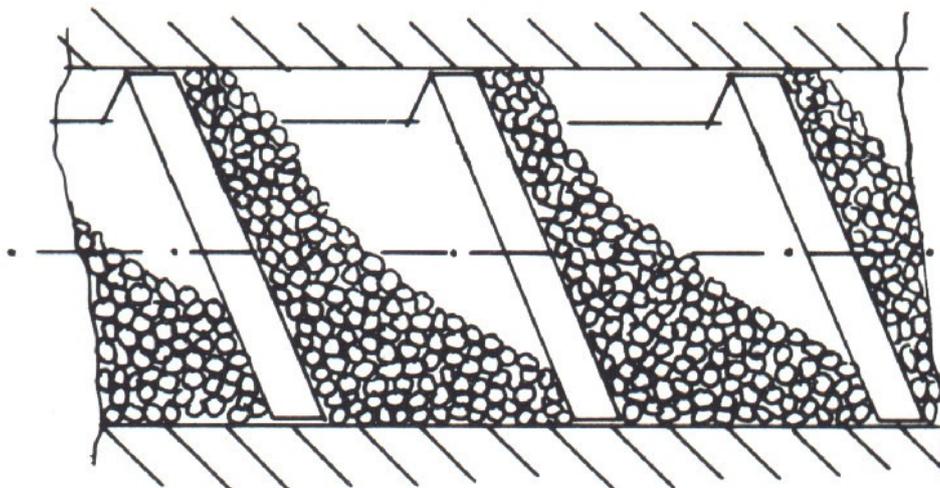


Figura 27. Representação da sub-zona de transporte arquimediano de sólidos particulados.

O transporte arquimediano ocorrerá quando o polímero entra na rosca a taxa menor àquela necessária para o particulado se mover como um leito sólido, isto é, com fluxo pistonado.

3.1.1.3 SUB-ZONA DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS INDUZIDO PELO ARRASTO

Quando as partículas sólidas atingirem a entrada da extrusora (bocal de alimentação) o flanco ativo do filete da rosca coleta-as de forma que:

- o material fluirá para dentro do canal da rosca;
- cessa o fluxo induzido pela gravidade;
- inicia o transporte induzido por arrasto.

Quando não há fluxo arquimediano no canal da rosca, isto é, há geração de pressão suficiente para compactar o material e, conseqüentemente, formação de leito sólido e fluxo em massa, as partículas poliméricas possuem três superfícies de contato ou interfaces a serem analisadas:

1. Com a superfície interna do cilindro: interface polímero sólido/cilindro (PS/C).
2. Com a superfície da rosca: interface polímero sólido/rosca (PS/R).
3. Entre as partículas: interface polímero/polímero (PS/PS).

Considerando que o material polimérico flui como um leito sólido, despreza-se PS/PS. Com a rosca girando e o cilindro parado surge uma velocidade relativa entre as duas superfícies de contato com o polímero. Se a fricção na interface PS/C exceder a fricção na interface PS/R então o material particulado será arrastado pelo canal da rosca em direção à matriz (direção axial).

Caso contrário, o material ficará no mesmo local do canal girando junto com a rosca. Portanto, no transporte de sólidos por arrasto, se todas as partículas sofrerem suficiente compactação no canal, ao longo da rosca, o sólido formará um leito sólido com fluxo em massa onde em qualquer seção transversal do leito sólido, todos os elementos movem-se com a mesma velocidade. Isto só pode ocorrer se há quantidade suficiente de pressão gerada no canal da rosca e o material não for elevadamente compressível.

Na abordagem geral para a análise do transporte de sólidos considera-se um elemento de volume do leito sólido, no canal da rosca, e determinam-se todas as forças que atuam neste elemento de leito sólido. Para análise das forças envolvidas no transporte de sólidos por arrasto induzido pela pressão, faz-se necessário o conhecimento sobre os elementos geométricos da rosca (Figura 28).

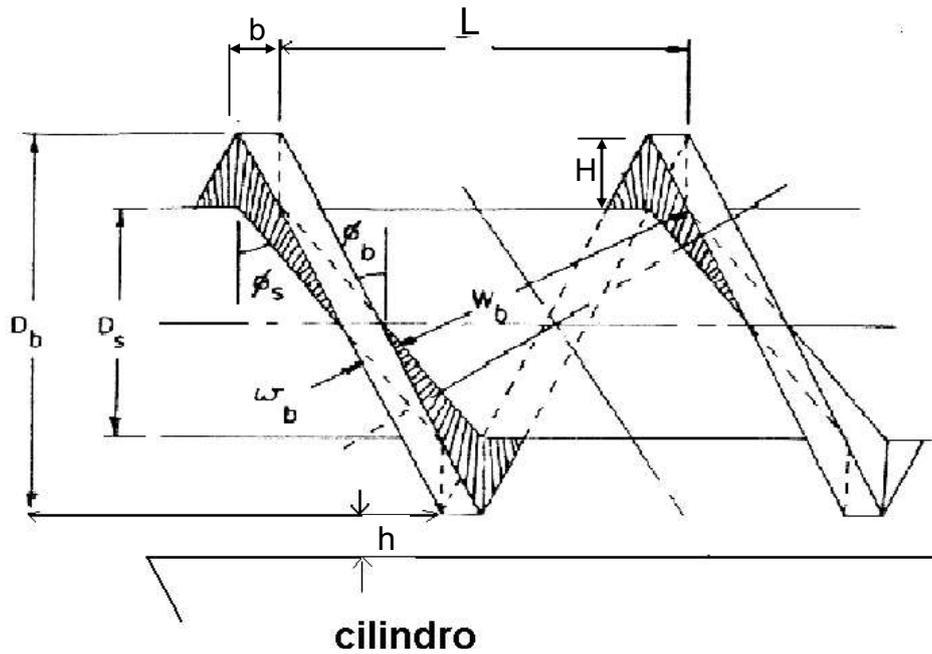


Figura 28. Elementos da geometria de uma rosca.

Na Figura 28 tem-se que:

- | | |
|-------------------------------|--|
| D_b - diâmetro externo | W_b - largura do canal |
| D_s - diâmetro da raiz | w_b - largura do filete |
| L - passo da hélice | ϕ_b - ângulo de hélice no diâmetro externo da rosca |
| h - folga da rosca | ϕ_s - ângulo de hélice no diâmetro interno da rosca |
| b - largura axial do filete | H - profundidade do canal |

As forças mais importantes são as **forças friccionais** nas superfícies metálicas (cilindro e rosca) e as **forças que resultam dos gradientes de pressão** no leito sólido.

Veja a figura apresentada a seguir.

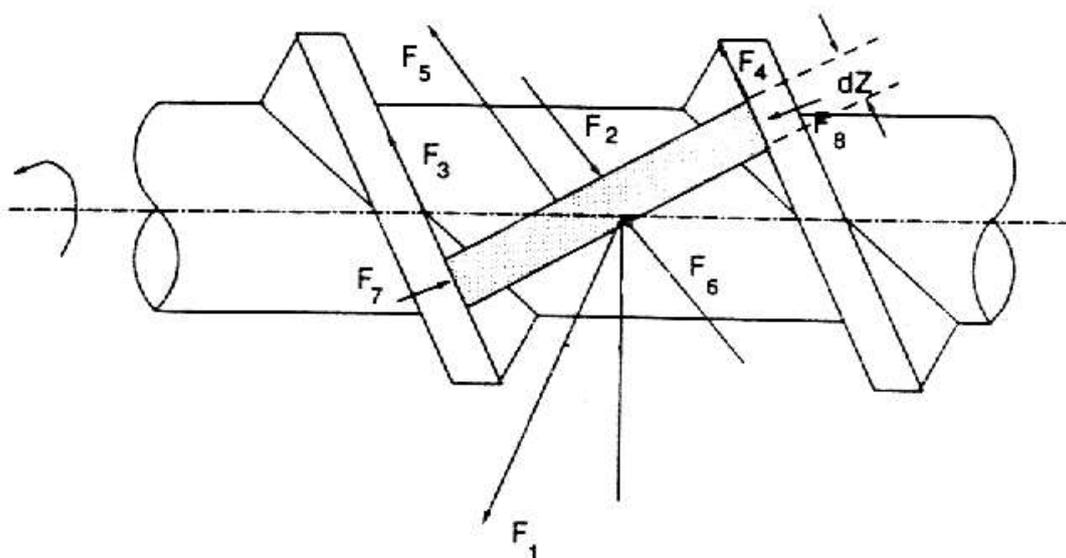


Figura 29. Representação das forças que atuam sobre um elemento do leito sólido.

Na Figura 29 tem-se que:

- F_1 = força friccional entre o leito sólido e a superfície interna do cilindro
- F_2 = força contra a face do leito sólido resultante da pressão local P
- F_3 = força friccional entre o leito sólido e o flanco ativo do filete
- F_4 = força friccional entre o leito sólido e o flanco passivo do filete
- F_5 = força friccional entre o leito sólido e a superfície da raiz da rosca
- F_6 = força contra a face do leito sólido resultante da pressão local $P+dP$
- F_7 = força normal do leito sólido na interface deste com o flanco ativo do filete.
- F_8 = força normal do leito sólido na interface deste com o flanco passivo do filete

A pressão no leito sólido aumenta exponencialmente com a distância ao longo do canal, conforme Figura 30 abaixo.

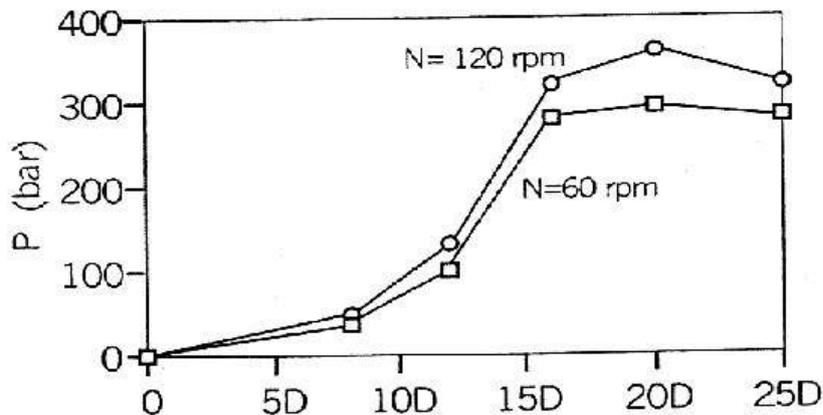


Figura 30. Distribuição da pressão em extrusora convencional (45 mm).

Para o transporte ótimo dos sólidos, a força friccional no cilindro deve ser maximizada e a força friccional na rosca deve ser minimizada. Muitas vezes, a rosca deve ser revestida com níquel ou cromo e altamente polida para minimizar o atrito. Em casos especiais a superfície da rosca pode ser impregnada com polímeros fluorados (Teflon) para obterem-se baixos coeficientes de fricção.

Por outro lado, a superfície interna do cilindro deve ser rugosa para aumentar o coeficiente de atrito. Lembre-se que se a força friccional no cilindro fosse nula, o leito sólido apenas giraria com a rosca e não iria para frente.

Com base nestas considerações, torna-se claro que para um bom transporte de sólidos, um grande coeficiente de fricção no cilindro é desejável. Muitas extrusoras têm ranhuras usinadas na superfície interna do cilindro, na seção de transporte de sólidos, para melhorar esse transporte.

A Figura 31 mostra como a vazão no transporte de sólido varia com o coeficiente de fricção entre o material granulado e a superfície do cilindro (f_b). As curvas mostradas representam diferentes e constantes coeficientes de fricção do material granulado e a superfície da rosca (f_s). Verifica-se que há um aumento abrupto quanto f_b é pequeno, mais tarde atinge um platô para altos valores de f_b . Dois problemas são evidentes quando $f_b \cong f_s$. Um deles é que a taxa de transporte de sólido (vazão) é consideravelmente baixa em relação ao que pode atingir. O outro problema é que pequenas mudanças em f_b resultarão em mudanças muito grandes nas taxas de transporte de sólidos quando $f_b \cong f_s$. Isto significa que há possibilidades de elevada instabilidade na extrusão quando, por natureza do processo, ocorrerem pequenas variações no coeficiente de atrito na superfície do cilindro, para $f_b \cong f_s$.

O benefício da seção de alimentação com ranhuras pode ser analisado pela teoria do transporte de sólidos induzido pelo arrasto. A Figura 31 mostra como a taxa de transporte de sólido varia com o coeficiente de fricção no cilindro (f_b). A Figura mostra as curvas de coeficientes de fricção constante na rosca

(f_s). As curvas apresentam um incremento abrupto quando $f_b \cong f_s$, onde a taxa de transporte de sólidos é consideravelmente baixa em relação ao valor teórico máximo (Q/Q_{max}). O problema é que pequenos incrementos de f_b resultam em mudanças muito grandes na taxa de transporte de sólidos quando $f_b \cong f_s$ gerando instabilidade no processo de extrusão.

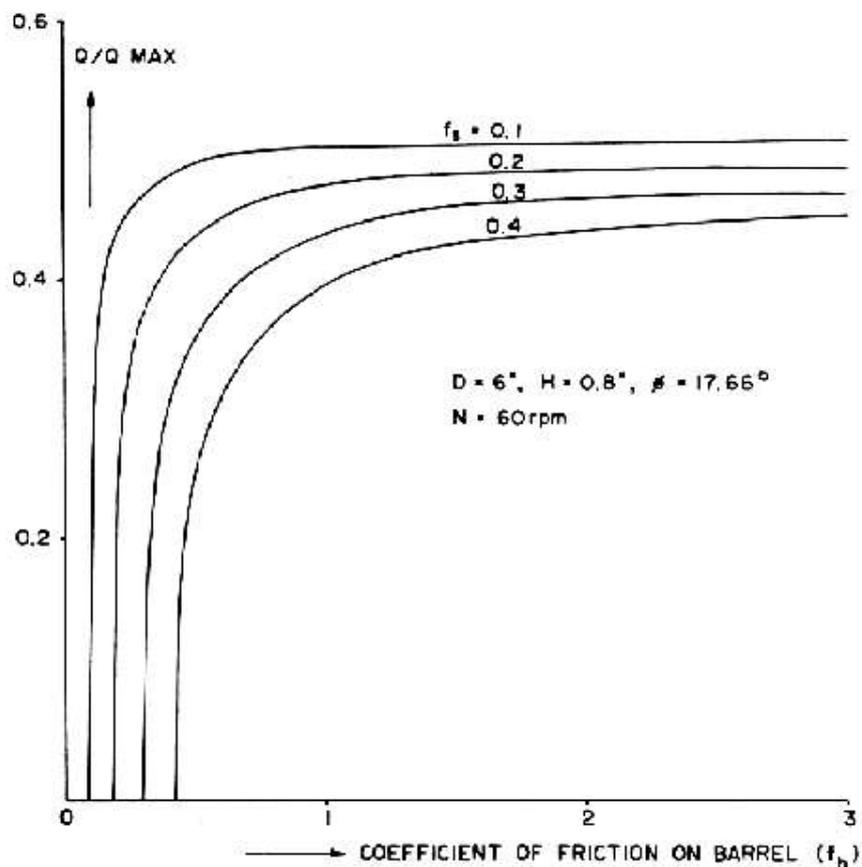


Figura 31. Taxa de transporte de sólidos como uma função do coeficiente de fricção contra o cilindro.

Quando f_b é aumentado para valores duas ou três vezes f_s , a taxa de transporte de sólidos aumenta substancialmente, mas, ao mesmo tempo, a inclinação da curva é bastante reduzida. Nesta situação, pequenas variações na fricção do cilindro resultarão somente em pequenas mudanças na taxa de transporte de sólidos. Portanto o processo será inerentemente muito mais estável quando f_b é muito maior do que f_s . Isto explica porque sistemas de ranhuras no cilindro podem reduzir substancialmente a instabilidade do processo de extrusão.

A Figura 32 mostra como a taxa de transporte de sólidos varia com o gradiente de pressão ao longo da sub-zona de transporte de sólidos induzido por arrasto. Quando $f_b \cong f_s$, a taxa de transporte de sólidos, a um gradiente de pressão zero, é muito pequena e a taxa cai substancialmente com um aumento do gradiente de pressão. A um gradiente de pressão relativamente pequeno, a taxa torna-se zero.

Quando f_b aumenta a f_s constante, a taxa de transporte de sólidos aumenta a um gradiente de pressão zero e a queda desta torna-se menos severa com o aumento do gradiente de pressão.

A valores relativamente elevados de f_b , a queda da taxa de transporte de sólidos torna-se muito pequena. De fato, a produção da extrusora torna-se essencialmente independente da pressão de retorno.

Resumindo, o aumento da relação entre o coeficiente de fricção no cilindro e o coeficiente de fricção na rosca aumenta a taxa de transporte de sólidos, aumenta a estabilidade e torna a taxa de transporte de sólidos menos dependente da pressão desenvolvida na rosca (pequenas flutuações de pressão não afetarão significativamente a taxa de transporte de sólidos).

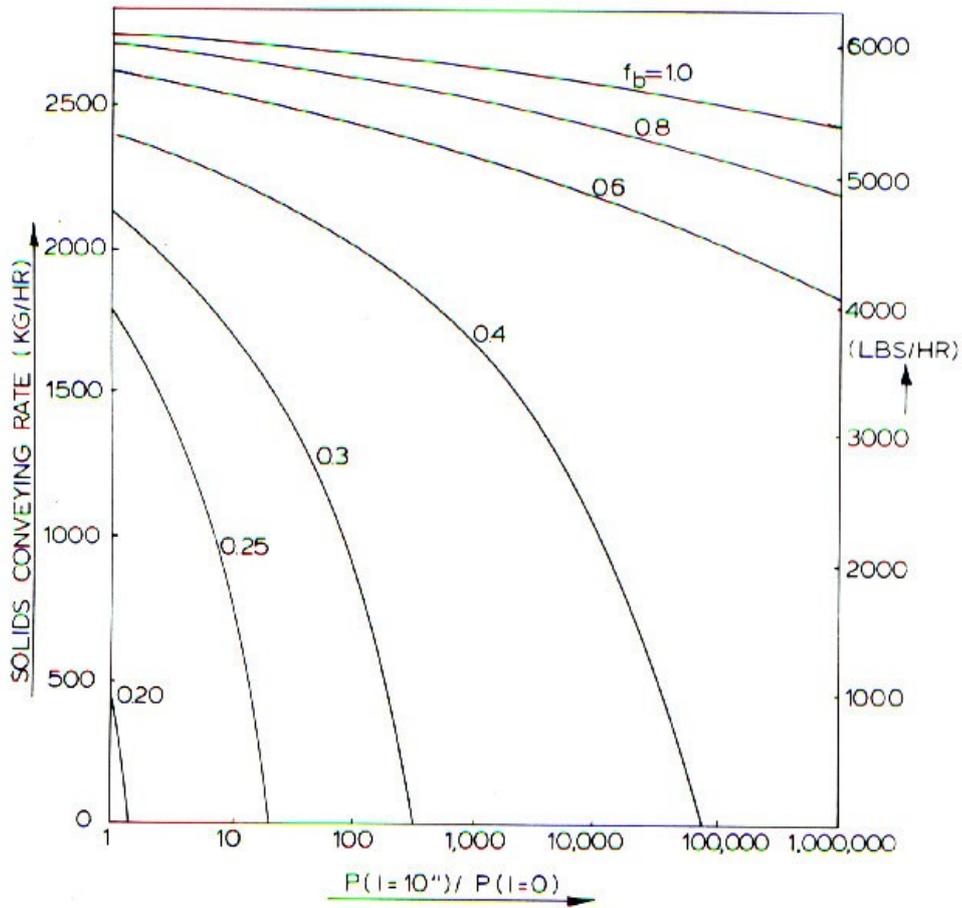


Figura 32. Taxa de transporte de sólidos como função do gradiente de pressão.

3.1.2 ZONA DE PLASTIFICAÇÃO

Na Figura 33 abaixo é apresentado o canal da rosca estendido. Observa-se que antes da região 1 está a **zona de transporte de sólidos por arrasto**. Entre a região 1 e 2, há a **zona de plastificação**. Após a região 2 desenvolve-se a **zona de transporte de fundido**.

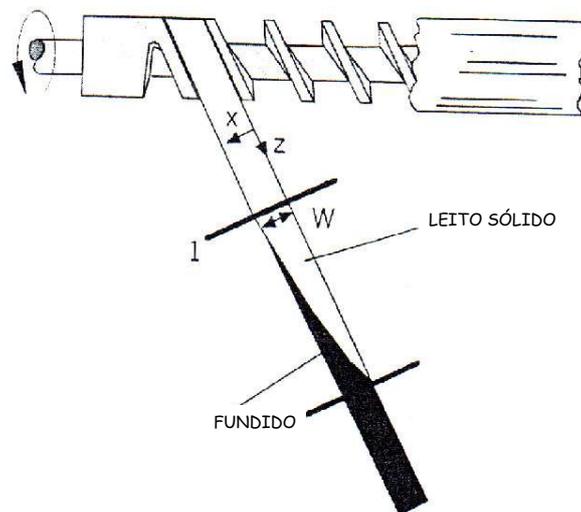


Figura 33. Canal da rosca estendido.

Após alguns passos na rosca, o material sólido apresenta-se compactado com fluxo em massa e, próximo às paredes do cilindro, este material atinge seu ponto de fusão.

Neste ponto (região 1 na Figura 33), termina a zona de transporte de sólidos (mais precisamente, a sub-zona de transporte de sólido induzido por arrasto) e inicia a zona de plastificação (mais precisamente a sub-zona de retorno).

A fusão ocorre a partir da energia transferida por dois mecanismos básicos:

- aquecimento por transferência de calor do cilindro aquecido para o polímero.
- aquecimento por dissipação viscosa, isto é, atrito nas interfaces do polímero com as superfícies sólidas metálicas e devido ao cisalhamento no fluido.

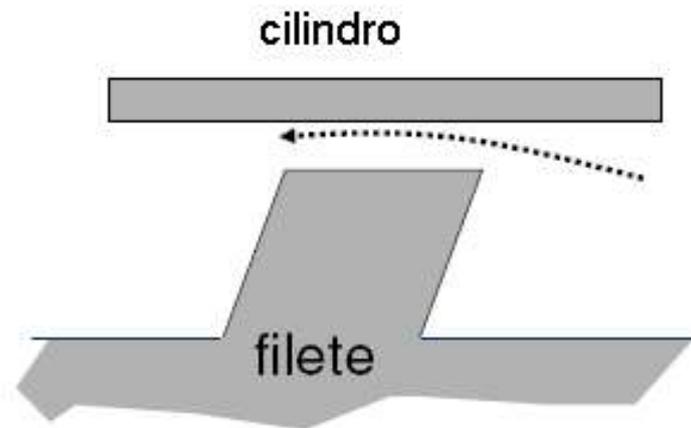


Figura 34. Retorno do material plastificado no topo do filete.

Assim que inicia a plastificação do polímero ocorre a formação de um filme fino de polímero plastificado, o qual possui um fluxo em sentido contrário ao desejado. Portanto, denomina-se de sub-zona de retorno.

O filme fino fica sujeito às altas taxas de cisalhamento resultando em um aumento drástico de sua espessura. Se a espessura do filme for menor do que o espaço mecânico entre o cume do filete da rosca e a parede do cilindro, o filme fluirá através do espaço sem criar um reservatório de fundido, conforme Figura 34 acima.

O aumento da espessura do filme de fundido causa um decréscimo gradual da taxa de cisalhamento com conseqüente diminuição da taxa de plastificação.

Isto se deve porque a velocidade relativa das superfícies, na interface do filme fundido/cilindro, provoca o deslizamento das camadas subseqüentes do polímero plastificado. Portanto, estas camadas subseqüentes apresentam velocidades cada vez menores, ocorrendo uma diminuição do gradiente de velocidade no sentido cilindro/rosca. Com a diminuição do gradiente de velocidade entre as camadas, diminui o cisalhamento entre elas e entre a que está em contato com o polímero sólido. À medida que a espessura do filme aumenta, este mecanismo se intensifica a ponto de diminuir a taxa de plastificação.

A formação do filme fundido pode ocorrer também nas demais interfaces sólidas. Porém, estes eventos são considerados pouco significativos.

Nesta sub-zona, embora a fusão já tenha iniciado, o principal mecanismo de plastificação por arraste viscoso ainda não começou.

3.1.2.1 SUB-ZONA DE PLASTIFICAÇÃO POR ARRASTE VISCOSO

Esta sub-zona inicia quando a espessura do filme for superior à folga radial existente entre o cilindro e a rosca. Na prática, observou-se que a plastificação por arraste viscoso somente acontece quando o filme atinge uma espessura de 5 a 7 vezes superior a este espaço.

Os mecanismos de transferência de calor envolvidos são aqueles apresentados para a sub-zona de retorno.

Nesta zona, o material fundido que se movimenta na direção da alimentação, bate no flanco ativo do filete e se deposita gerando um reservatório de material fundido. O material sólido e o fundido estão bem separados, sendo que o primeiro acumula-se em bloco, junto ao flanco passivo, enquanto o segundo forma um reservatório junto ao flanco ativo (*"melt pool"*). O leito sólido é empurrado contra o flanco passivo da rosca sendo forçado também a se movimentar na direção do cilindro, diminuindo, desta maneira, a espessura do filme (Figura 35).

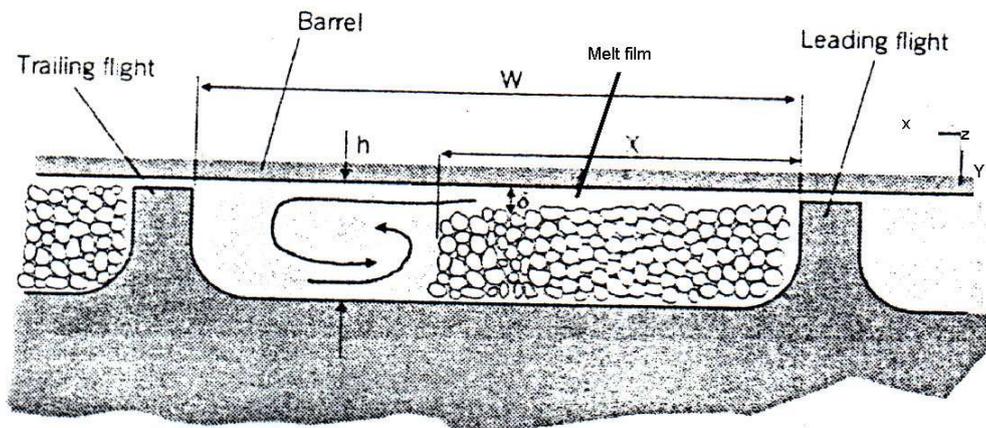


Figura 35. Formação de depósito de material plastificado.

A largura do reservatório de fundido aumenta à medida que mais polímero é plastificado; em contrapartida, a largura do leito sólido diminui. A Figura 36 apresenta, esquematicamente, a evolução do processo de plastificação do polímero ao longo da zona de plastificação.

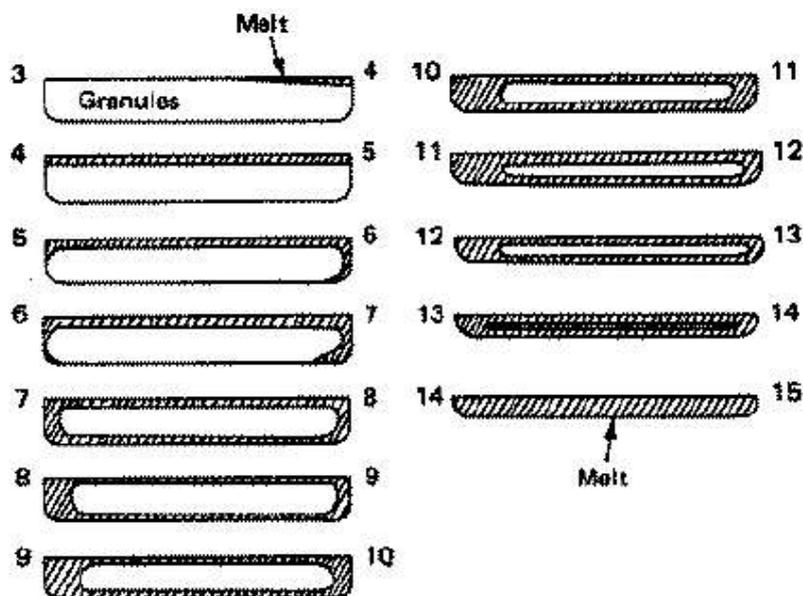


Figura 36. Representação esquemática da evolução da plastificação na zona de plastificação.

Ainda, pode ocorrer o rompimento prematuro do leito sólido e os fragmentos ficam envolvidos pelo material fundido. Caso este rompimento ocorra, a velocidade de plastificação sofre uma redução.

O filme que se situa entre o leito sólido e a superfície do cilindro tem sua espessura aumentada na direção do reservatório. Dentro do reservatório de fundido, o material apresenta um movimento helicoidal, como visto na Figura 35.

3.1.3 ZONA DE TRANSPORTE DE FUNDIDO

Esta zona inicia quando todo o material está plastificado. Nesta zona o material continua sendo transportado com um movimento helicoidal. Este movimento helicoidal é resultante dos diferentes tipos de fluxos existentes nesta zona. Para entendermos estes tipos de fluxos, se faz necessário estabelecer o sistema de coordenadas para as velocidades envolvidas no canal da rosca (Figura 37).

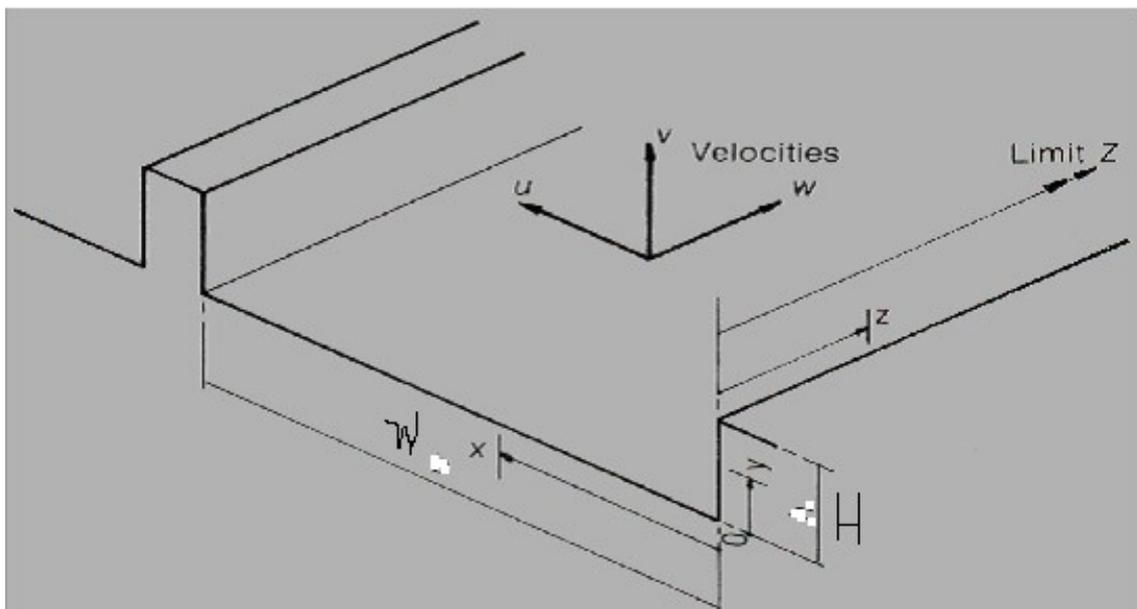


Figura 37. Sistema de coordenadas para velocidades envolvidas no fluxo de material polimérico fundido na zona de transporte de fundido.

De acordo com Middlemann:

- considera-se o fluido com comportamento newtoniano;
- fluxo isotérmico;
- só para transporte de fundido;
- velocidades do fundido em apenas duas direções (fluxo bidimensional $v=zero$);
- curvatura do cilindro ignorada;
- as forças gravitacionais são desprezadas;
- canal da rosca desenrolado;
- rosca parada e cilindro girando linearmente com velocidade V ;
- as dimensões da rosca são constantes;
- a largura $b \gg$ que a profundidade h ;
- quaisquer perturbações no fluxo devido à irregularidade são desprezadas.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DE FLUXO PELA ROSCA

O mais conveniente é considerar que o fluxo total (Q_t) seja composto por três diferentes tipos de fluxos individuais.

3.2.1 FLUXO DE ARRASTO (*DRAG FLOW*)

- Devido a rotação da rosca e a velocidade diferencial de outras superfícies adjacentes da rosca e do cilindro.
- Transporte do fundido por cisalhamento.
- Direção da matriz (direção positiva).

Fluxo por arrasto Q_d (Equação 01)

$$Q_d = (W \times H \times \pi \times D \times N \times \cos\theta) : 2 \quad (\text{Equação 01})$$

3.2.2 FLUXO POR DIFERENÇA DE PRESSÃO (*PRESSURE FLOW*)

- Devido a restrição do fluxo imposta pela matriz, conjunto de telas e placa perfurada.
- Direção contrária à matriz (direção negativa).

Fluxo por pressão (efeito de restrição) Q_p (Equação 02)

$$Q_p = - (\pi \times D \times H^3 \times \sin^2\theta \times \Delta p) : 12\eta L \quad (\text{Equação 02})$$

Onde o sinal negativo, adotado por convenção, indica fluxo no sentido contrário ao do Q_d .

3.2.3 FLUXO DE VAZAMENTO (*DELAY FLOW*)

- Devido à folga entre o topo do filete da rosca e as paredes do cilindro.
- Direção contrária à matriz (direção negativa).

Um tipo particular de fluxo por pressão é o fluxo contrário que ocorre através da folga situada entre a superfície do cilindro e o topo do filete.

Este fluxo é chamado de fluxo de vazamento, retardo ou retorno (Q_l) e torna-se mais significativo quando a estrutura se torna desgastada e pode ser incluído na equação de fluxo global (Q_t) da extrusora.

Entretanto, diferente de Q_p a Q_l representa um real contra-fluxo do fundido, na direção contrária ao fluxo de arrasto, ou seja, na direção da matriz para a seção de alimentação.

Para uma rosca perfeitamente centrada, Q_l (Equação 03).

$$Q_l = - (\pi^2 \times D^2 \times h^3 \times \tan\theta \times \Delta p) : 12\eta L_b \quad (\text{Equação 03})$$

Onde o sinal negativo, adotado por convenção, indica fluxo no sentido contrário ao do Q_p .

3.2.4 FLUXO TOTAL

Se não existir restrição ao transporte de fundido na saída da matriz, diz-se que a produção global (Q_t) é igual ao fluxo por arrasto (descarga aberta).

Sempre que uma matriz ou qualquer elemento adicional, como placa perfurada e/ou telas, que se opõe ao fluxo, é colocada após a extrusora a pressão criada atua contra as forças de arrasto para desenvolver o fluxo de pressão no material.

Os perfis de velocidade apresentados na Figura 38 mostram o comportamento da velocidade de fluxo por arrasto, o comportamento devido ao fluxo de pressão e o fluxo resultante de uma rosca extrusora, para um fluido newtoniano.



Figura 38. Perfis de velocidade para um fluido Newtoniano.

Embora o fluxo de pressão reduza a capacidade global de bombeamento, esta dimensão também tende a melhorar o grau de mistura dentro do canal da rosca, como resultado de um aumento da tensão de cisalhamento (mistura dispersiva) e de um aumento na deformação de cisalhamento total imposto (mistura distributiva).

A produção total (Equação 04) é assumida como sendo uma soma algébrica simples dos componentes de fluxo individuais.

$$Q_t = Q_d + Q_p + Q_l \quad (\text{Equação 04})$$

Sendo Q_p e Q_l negativos, o que resulta (Equação 05)

$$Q_t = [(W \times H \times \pi \times D \times N \times \cos\theta) : 2] - [(\pi \times D \times H^3 \times \sin^2\theta \times \Delta p) : 12\eta L] - [(\pi^2 \times D^2 \times h^3 \times \tan\theta \times \Delta p) : 12\eta L b] \quad (\text{Equação 05})$$

Esta equação tem a forma geral (Equação 06):

$$Q_t = -[(C : \eta) \times \Delta p] + AN \quad (\text{Equação 06})$$

Onde: C e A são constantes geométricas referentes a rosca.

Esta equação é chamada de **Equação Característica da Extrusora** e possui importância fundamental para prever velocidades de produção da extrusora (para compostos plásticos de viscosidade pré-determinada).

A análise anterior, baseada em um arranjo de suposição, é inevitavelmente sujeita a erro, cuja magnitude é melhor determinada por verificação experimental.

Todavia esta equação possibilita uma avaliação sem quantitativo imediato dos efeitos prováveis relacionados a modificação dos valores das variáveis.

A maneira mais conveniente de fazer isso é estudar a característica da extrusora, que relaciona produção com pressão na forma de gráficos, conforme figura abaixo:

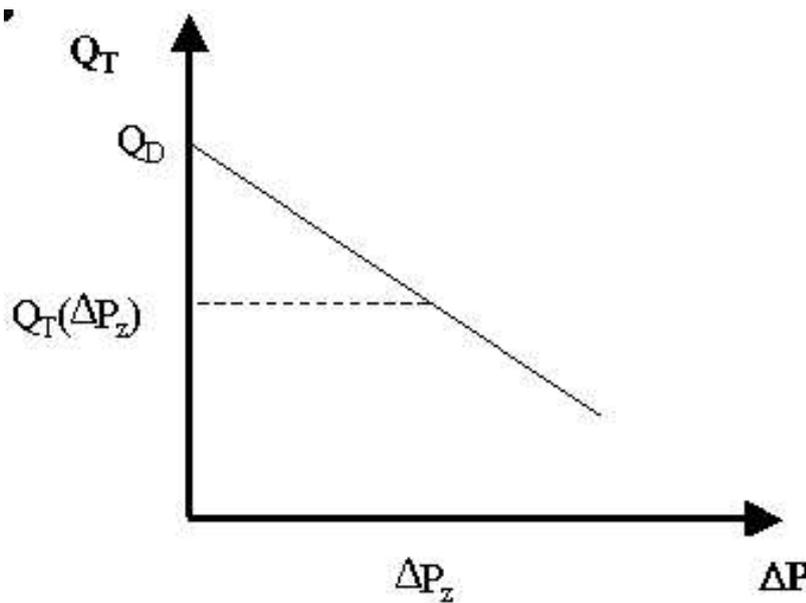


Figura 39. Pressão versus fluxo total de uma extrusora.

Observa-se na Figura 39:

1. Descarga aberta ($\Delta P = 0$): esta situação é encontrada na ausência de restrição de fluxo, ou seja, o escoamento à pressão zero resulta na condição $Q_t = Q_d$. Para uma determinada velocidade do parafuso, Q_t é uma função somente do **diâmetro de rosca**, da **profundidade do canal** (razão de compressão) e **ângulo de hélice**, conforme análise da equação para Q_t . Características do fluxo do fundido não exercem um papel direto no estabelecimento da produção máxima teórica para um determinado projeto de máquina.

2. Trabalhando contra uma pressão maior que zero (ΔP_z): Se a pressão de entrada na matriz (ΔP_z) pode ser prevista, torna-se simples antecipar a produção resultante pelo gráfico $Q_t \times \Delta P$.

A sensibilidade da capacidade de produção de extrusoras de rosca simples com relação a efeitos de pressão na entrada da matriz é bem documentada e freqüentemente impõe severas limitações à rentabilidade das linhas de produção. Uma expressão adequada para relacionar o fator de ineficiência do processo⁴ a diversos parâmetros importantes é obtida através da relação:

$$Q_p : Q_d = [H^2 + (\text{sen}\theta \times \Delta p)] : (6 \times \pi \times N \times \eta \times L \times D) \quad (\text{Equação 07})$$

Fatores de ineficiência elevados observados enfatizam a ineficiência de extrusoras de rosca simples.

⁴ $Q_p : Q_d$ é o fator de ineficiência de uma extrusora.

A sensibilidade da produção com relação à pressão na entrada da matriz salienta a necessidade do desenvolvimento de mecanismos de bombeamento mais positivos tal como os sistemas da dupla rosca.

Com relação à análise de escoamento, somente um único termo para a η assume uma influência direta sobre as velocidades de produção.

Entretanto, deve-se notar que o composto deve atender as suposições consideradas na análise do escoamento por cisalhamento, que é a base para o desenvolvimento da equação de fluxo por pressão.

Embora o tratamento matemático simples seja uma consequência direta da suposição de que o fluido seja newtoniano, deve-se considerar que a maioria dos termoplásticos fundidos apresentam pseudo-plasticidade, a magnitude do erro é determinada pela medida do afastamento do comportamento newtoniano.

Todavia, este tratamento matemático é suficiente para mostrar tendências, o grande erro quantitativo é com frequência suficientemente pequeno para tornar desnecessário o desenvolvimento de um tratamento matemático mais rigoroso.

3.4 TRANSPORTE DE FUNDIDO PELA MATRIZ

À medida que o polímero flui através da matriz ele adota a forma dos canais desta. Assim, quando o material deixa a matriz, a sua forma corresponderá aproximadamente à seção transversal desta.

Já que a matriz exerce uma resistência ao fluxo, é necessária uma pressão para forçar o material através desta. É a pressão no cabeçote ΔP .

Esta pressão é determinada:

- pela forma da matriz (K)
- pela temperatura do polímero;
- pela vazão;
- pelas propriedades reológicas do polímero.

É importante salientar que a pressão na matriz é causada pela restrição que esta impõe. Se o polímero, a vazão, a matriz e as temperaturas são constantes, então não faz nenhuma diferença se a extrusora é de parafuso simples, duplo, cônica, etc., a pressão na matriz será a mesma (efeito de restrição da matriz).

A vazão através da matriz Q_m pode ser relacionada à queda de pressão ΔP pela seguinte equação (Equação 08):

$$Q_m = (K : \eta) \times \Delta P \quad (\text{Equação 08})$$

Onde K é uma constante relacionada à geometria da matriz.

Valores de K para diferentes geometrias:

- Circular (tarugo) $K = (\pi \times R_m^4) : 8 \times L_m$ (Equação 09)

Onde R_m é o raio interno da matriz e L_m é o comprimento da matriz

- Filmes tubulares $K = (W_m \times H_m^3) : 12 \times L_m$ (Equação 10)

Onde W_m representa o diâmetro médio interno da matriz, H_m é a espessura da fenda ou lábio da matriz e L_m é o comprimento da matriz.

Q_m é chamada de equação característica da matriz e o valor de $K : \eta$ corresponde ao gradiente de pressão pela matriz. Como a vazão que ocorre pela rosca é a mesma que ocorrerá pela matriz, a intersecção entre as duas equações de fluxo indicará esta.

3.5 PONTO OPERACIONAL DE UMA LINHA DE EXTRUSÃO

Um dos principais objetivos no desenvolvimento de uma linha de extrusão é, tanto quanto possível, projetar para que o processo ocorra sob baixa pressão e elevada vazão. Portanto, quando um número de fatores que determinam a localização do ponto de operação é considerado, torna-se importante envolver estudos de otimização tanto a respeito do projeto do equipamento quanto da dinâmica operacional que o envolve.

Os principais fatores envolvidos com a otimização do ponto operacional de uma linha de extrusão podem ser resumidos em:

- velocidade da rosca extrusora;
- geometria da rosca extrusora;
- geometria da matriz; e
- viscosidade do fundido

A construção de gráfico Q_T versus ΔP para identificação do ponto de operação será utilizada como ferramenta de análise (Figura 40)

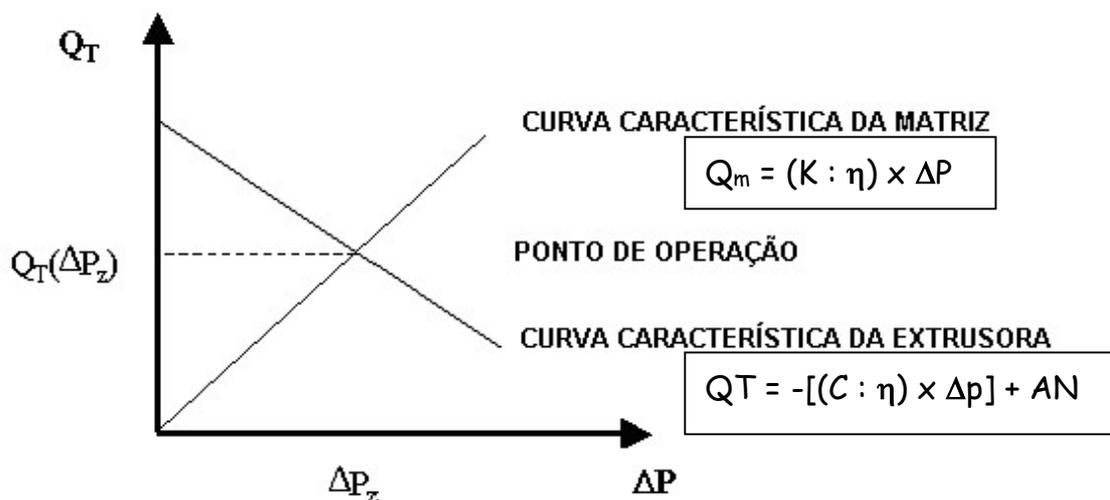


Figura 40. Gráfico Q_T versus ΔP . Ponto de operação.

Entretanto o caráter linear das curvas características se deve à solução das equações para Q_T e Q_m apresentarem o comportamento newtoniano. A natureza pseudoplástica da maioria dos polímeros implica em curvas características que apresentam a tendência da viscosidade cisalhante decrescer a altas taxas de processamento. Por esta razão é que as curvas características que mostram os efeitos das condições de processamento têm sido apresentadas na forma não linear. Outrossim, a análise considera que não há desgaste da rosca, portanto, considera-se o fluxo por vazamento Q_L como zero.

3.5.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA ROSCA NO PONTO DE PRODUÇÃO

Um aumento na velocidade da rosca implica em aumento da componente de vazão Q_D (fluxo de arrasto) da vazão total Q_T (Equações 04 e 06, respectivamente). Os valores de vazão para a descarga aberta ($\Delta P = 0$) aumentam. Quando a velocidade da rosca aumenta, aumenta o volume de material fornecido à matriz pela rosca, portanto aumenta a pressão na entrada da matriz. Com o aumento na rotação da rosca, aumenta a geração de calor viscoso, a temperatura local aumenta, a viscosidade tenderá a cair e isto implicará em alteração da inclinação da curva característica da rosca.

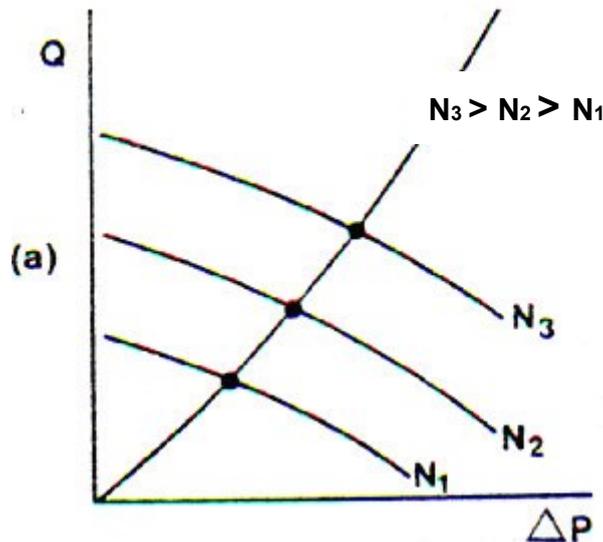


Figura 41. Gráfico Q versus ΔP , com variação de N .

3.5.2 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA ROSCA NO PONTO DE PRODUÇÃO

Há duas variáveis da geometria da rosca a serem consideradas: a profundidade do canal H e o comprimento do canal L , ambas na zona de transporte de fundido.

A variável de maior importância é a profundidade do canal H . Há duas situações a serem analisadas para a variação de H na zona de transporte de fundido:

- Os valores de vazão para a descarga aberta ($\Delta P = 0$). Se considerarmos o processo sem restrição da matriz, o fluxo de pressão Q_P é zero, logo $Q_T = Q_D$. Assim, quanto maior for o valor de H , maior será o valor da vazão total, conforme Figura 42.

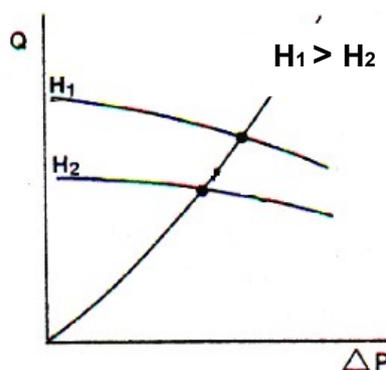


Figura 42. Gráfico Q versus ΔP , com variação de H .

b) Os valores de vazão com restrição da matriz ($\Delta P \neq 0$). Se considerarmos o processo com restrição da matriz, o fluxo de pressão é maior que zero, logo $Q_T = Q_D + Q_P$. Assim, um aumento pequeno de H é muito mais efetivo para o aumento do fluxo por pressão (H na terceira potencia) do que para o fluxo de arrasto (H na primeira potencia). Como um aumento do fluxo por pressão ocorre uma diminuição do fluxo total. Por outro lado, com um aumento do fluxo por arrasto, aumentando o fluxo total. Como resultado, há uma queda mais acentuada na vazão total com aumento de H , para a mesma variação de pressão (ΔP), conforme Figura 42.

Agora, se as características de alimentação, transporte de sólidos e plastificação permitirem um aumento do comprimento da zona de transporte de fundido, haverá um decréscimo do gradiente de pressão resultante. Pela Equação 05, verificamos que um aumento do comprimento L resultará em um aumento na vazão total, devido à redução do fluxo por pressão. Esta redução do fluxo por pressão é resultante da redução do gradiente de pressão com o aumento de L , isto é, há uma redução da resultante entre F_2 e F_6 (Figura 29). Este efeito pode ser analisado no gráfico da Figura 43.

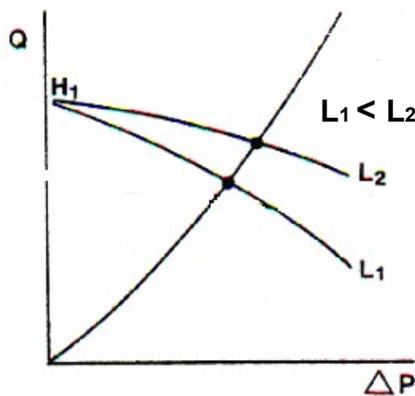


Figura 43. Gráfico Q versus ΔP , com variação de L .

3.5.3 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA MATRIZ NO PONTO DE PRODUÇÃO

O ponto operacional se desloca ao longo da curva característica da rosca, se as dimensões laterais e longitudinais da matriz são ajustadas (Equações 09 e 10). A fim de estar em conformidade com os critérios de manufatura (baixa pressão e alta produção), o efeito da restrição da matriz é diminuído pelo decréscimo do comprimento da matriz, ou associando este decréscimo do comprimento com um aumento das dimensões laterais da ferramenta, conforme Figura 44 abaixo.

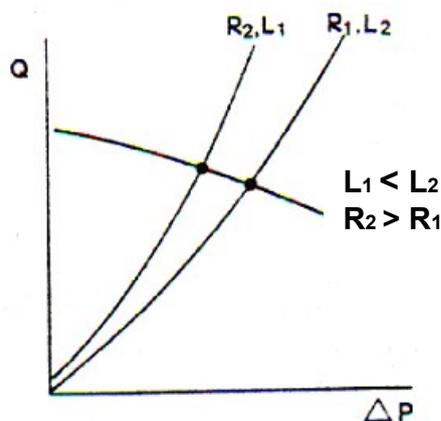


Figura 44. Gráfico Q versus ΔP , com variação de R e L da matriz.

3.5.4 INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE DO FUNDIDO NO PONTO DE PRODUÇÃO

As Equações 06 e 08 sugerem que um aumento na viscosidade do fundido resultará em um aumento da pressão na entrada da matriz, para uma vazão total praticamente constante.

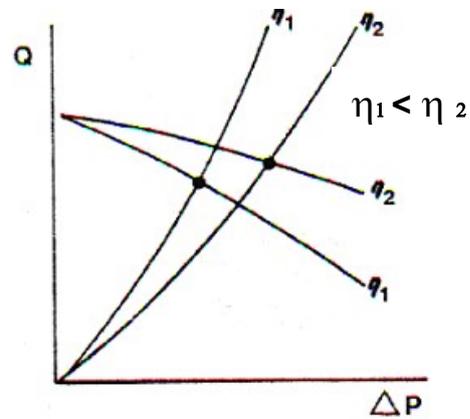
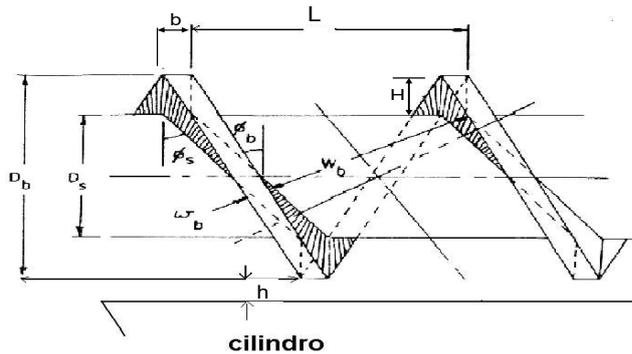


Figura 45. Gráfico Q versus ΔP , com variação de viscosidade do fundido.

Cálculos de uma rosca universal: D = 60 mm - L/D = 30D



Dados

- | | |
|---|-------------------------------------|
| W_b - 55 mm = 0,055 m | - largura do canal da rosca |
| H - 10 mm = 0,010 m | - profundidade do canal da rosca |
| h - 0,06 mm = 0,00006 m | - folga da rosca com o cilindro |
| L - 60 mm = 0,06 m | - passo da hélice da rosca |
| D_b - 60 mm = 0,06 m | - diâmetro externo da rosca |
| L/D - 30D = 30 x 0,06 m = 1,8 m | - comprimento da rosca |
| b - 6 mm = 0,006 m | - largura axial do filete da rosca |
| π - 3,1416 | - pi |
| θ_s - 17,66° | - ângulo de hélice no diâmetro inte |
| $\cos \theta_s$ - 0,372072 | - coseno do ângulo de hélice |
| $\text{sen}^2 \theta_s$ - 0,861562 | - seno quadrado do ângulo de hélice |
| $\tan \theta_s$ - -2,494688043 | - tangente do ângulo de hélice |
| N - 100 rpm = 6000 rph | - velocidade de rotação da rosca |
| ρ - 940 kg/m ³ | - densidade do PEAD |
| η - 10 ³ Pa.s = 0,028 kgf.h/m ² | - viscosidade do PEAD |
| δP - 200 kgf/cm ² = 2.000.000 kgf/m ² | - diferencial de pressão na rosca |

Fluxo de arraste - (drag flow)

$$Q_d = \frac{W_b \times H \times \pi \times D_b \times \cos \theta_s \times N}{2}$$

$$Q_d = \frac{0,055 \times 0,010 \times 3,1416 \times 0,06 \times 0,372072 \times 6000}{2}$$

$Q_d = 0,115721238 \text{ m}^3/\text{h}$

considerando a densidade do PEAD - $\rho = 940 \text{ kg/m}^3$

$Q_d = 0,11572124 \times 940 = \underline{108.778} \text{ kg/h}$

Fluxo de diferença de pressão - (pressure flow)

$$Q_P = \frac{\pi \times D_b \times H^3 \times \delta P \times \text{sen}^2 \theta}{12 \times \eta \times L/D}$$

$$Q_P = \frac{3,1416 \times 0,06 \times 0,010^3 \times 2000000 \times 0,861562}{12 \times 2,88 \times 1,8}$$

$Q_P = - 0,005221 \text{ m}^3/\text{h} \quad 1,175$

considerando a densidade do PEAD - $\rho = 940 \text{ kg/m}^3$

$Q_P = - 0,005221 \times 940 = - \underline{4.908} \text{ kg/h}$

Fluxo de vazamento - (delay flow)

$$Q_l = \frac{\pi^2 \times D_b^2 \times h^3 \times \delta P \times \tan \theta_s}{12 \times \eta \times L \times b}$$

$$Q_l = \frac{3,1416^2 \times 0,06^2 \times 0,00006^3 \times 2000000 \times -2,494688043}{12 \times 2,88 \times 0,06 \times 0,006}$$

$Q_l = - 3,07771E-06 \text{ m}^3/\text{h}$

considerando a densidade do PEAD - $\rho = 940 \text{ kg/m}^3$

$Q_l = - 3,07771 \times 10^{-6} \times 940 = - \underline{0,00289305} \text{ kg/h}$

Fluxo Total $QT = 108,778 - 4,908 - 0,00289305 = 103,86711904 \text{ kg/h} = \underline{104 \text{ kg/h}}$

Ineficiência $Q_P/Q_d = \underline{4,5119\%}$

4 PROJETO DE ROSCA

Para um perfeito funcionamento da extrusora, um projeto apropriado da simetria da rosca deve ser trabalhado.

É importante reconhecer se um problema na extrusão tem como causa:

- o material;
- variável de processo;
- projeto da matriz;
- projeto da rosca;

4.1 CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS

É importante que a rosca tenha resistência mecânica suficiente para suportar as tensões impostas pelo processo de transformação na extrusora.

4.1.1 RESISTÊNCIA TORCIONAL DA ROSCA

$$\tau = \frac{C \cdot Z}{N}$$

Constante de conversão (7124 para o torque em N.m)

Potência transmitida para a rosca (HP)

RPM da rosca

Torque

$Z = Z_{\text{motor}} \cdot E_{\text{motor}} \cdot E_{\text{transmissão}}$

Emotor = eficiência do motor
Etransmissão = eficiência da transmissão

Para evitar que a rosca rompa, ao longo de sua seção transversal, a máxima tensão imposta à rosca deve ser menor que a tensão de ruptura do aço de sua constituição.

4.1.2 RESISTÊNCIA DO FILETE DA ROSCA

Analisando as forças que atuam sobre um elemento sólido (Figura 29) verifica-se que o σ_P entre o flanco ativo e o passivo, é a principal carga no filete da rosca, ainda atuam, o fluxo de retorno através da folga, a tensão cisalhante no topo do filete, e a carga adicional no filete.

4.1.3 DEFLEXÃO LATERAL DA ROSCA

Existem várias causas que provocam a deflexão lateral da rosca. A que mais atua é a força da gravidade. Assim, considerando que não haja polímero na rosca, que o sistema de acoplamento seja rígido, e que só ocorre o movimento de rotação; pode-se inferir que a flexão da rosca é representada como uma função do comprimento da rosca, para um material, e geometria de rosca.

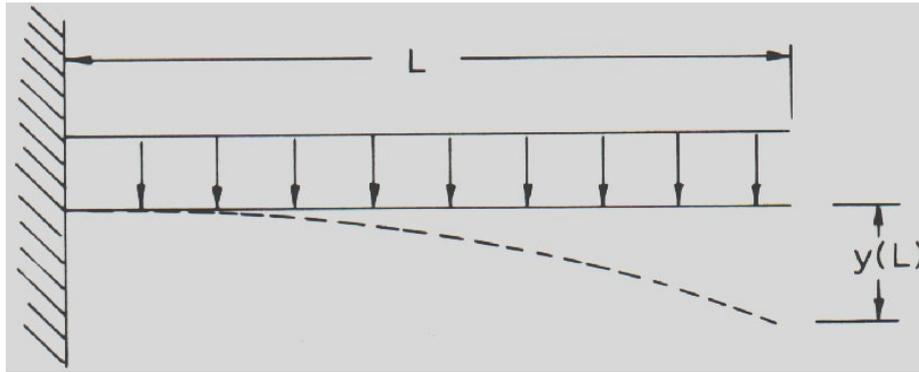


Figura 46. Representação esquemática da deflexão de uma rosca simples.

O polímero existente entre a rosca e o cilindro tem a função de suporte, evitando o contato entre estas partes. A força suporte necessária para conter a flexão pelo peso da rosca, tende a aumentar muito quando a razão L/D aumenta.

4.1.4 RESSONÂNCIA

Ocorre quando a rosca atinge uma velocidade crítica e torna-se dinamicamente instável com grandes amplitudes de deflexão laterais.

4.1.5 DISTRIBUIÇÃO NÃO-UNIFORME DA PRESSÃO AO LONGO DA CIRCUNFERÊNCIA DA ROSCA

Diferenças de 1 MPa entre diferentes posições transversais da rosca implicam no surgimento de significativa força de reação lateral. Este fenômeno é potencializado para grandes ângulos de hélice e no final da seção de compressão, principalmente se a razão de compressão for elevada. Estas forças provocam a flexão da rosca.

Como problema gerado pela flexão da rosca, tem-se o desgaste na região de contato com o cilindro.

4.2 OTIMIZAÇÃO PARA A PRODUÇÃO

Principais objetivos no projeto de uma rosca:

- resistência mecânica;
- produtividade;
- qualidade do fundido (homogeneidade).

Geralmente, com o aumento da produtividade ocorre uma diminuição na homogeneização. Por quê?

Porque o tempo de residência do material (TRM) na rosca (mantendo-se constante outros parâmetros) é proporcional ao comprimento da rosca e inversamente proporcional à sua rotação.

$$\text{TRM} \begin{cases} \propto L \\ \propto \frac{1}{\text{RPM}} \end{cases}$$

Roscas curtas apresentam limitações no que se refere a altos valores de rendimento; uniformidade de composição e temperatura.

O comprimento L mínimo para roscas de termoplásticos está em torno de 15D. Para extrusão de borracha, o comprimento L pode ser menor porque o material possui características mais plásticas (antes da vulcanização) do que termoplásticos sólidos. Portanto, há a necessidade de que o cisalhamento seja mínimo (menor geração de calor viscoso para evitar pré-vulcanização). Recomenda-se que as roscas para borrachas alimentadas com polímero frio seja em torno de 12D.

Na prática, para altas velocidades rotacionais e elevada homogeneidade, o tamanho da rosca recomendável para termoplásticos está entre 24 – 28D. Caso seja necessária a degasagem recomenda-se adicionar de 6 – 8D no comprimento total.

Não esquecer:

- quanto > L > potência requerida (> HP)
- quanto > HP > torque > resistência torcional deve ter a rosca (principalmente a seção de compressão)

Exemplo:

- PVC (rígido) com ↓ rendimento → 15 D ou menos
- Nylon com ↑ rendimento → mínimo 24 D

4.2.1 OTIMIZAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE SÓLIDO

Flutuações da vazão na zona de transporte de sólidos

Flutuações = instabilidade = estado não estacionário



Possíveis flutuações transmitidas para as zonas seguintes



Possíveis flutuações da pressão e produção

4.2.1.1 O EFEITO DO COEFICIENTE DE FRICÇÃO

**$\Delta \sim 20\%$ no
coeficiente de
fricção**



**Mudanças no
fluxo de sólidos
entre 100 e 1000%**

- Para otimizar o transporte de sólidos, a força friccional no cilindro deve ser a máxima possível e mínima na rosca;
- Ranhuras internas no canhão aumentam significativamente o transporte de sólidos, bem como a sua estabilidade;
- Para minimizar o coeficiente friccional da rosca, pode-se revesti-la com cromo (cromagem) ou níquel (niquelagem);
- Há casos de revestimento da rosca com teflon (TFE – Polímero fluorado);

- Programar/controlar um perfil de temperaturas da rosca e do cilindro permite que o coeficiente de fricção seja:



O efeito da temperatura no desempenho da extrusora, geralmente é maior na seção de alimentação do que nas outras seções.

4.2.1.2 O EFEITO DA PROFUNDIDADE DO CANAL

Existe uma profundidade ótima do canal da rosca na qual a taxa de transporte de sólidos alcança um máximo, para um determinado gradiente de pressão ($\frac{\partial P}{\partial z}$) ou P/P_0 .

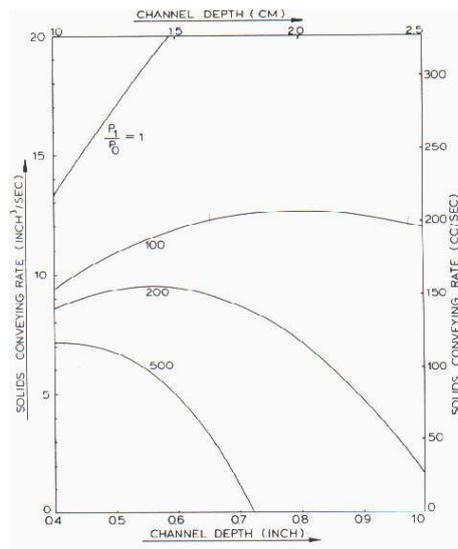


Figura 47. Transporte de sólidos x Profundidade do canal para diferentes gradientes de pressão.

Nota-se na Figura 47 que, quando o gradiente de pressão aumenta, a profundidade ótima do canal diminui. A profundidade ótima do canal na seção de alimentação está, freqüentemente, entre 0,10 - 0,15 D.

4.2.1.3 O EFEITO DO ÂNGULO DE HÉLICE

- Ângulo de hélice de 90° implica em taxa de transporte nula.
- Existe um valor ótimo de ângulo de hélice entre 0 e 90°.
- Na maioria das roscas extrusoras, o ângulo de hélice na seção de alimentação varia de 15 a 25°, sendo o mais comum 17,66°.
- Para calcular o ângulo de hélice ótimo, é necessário conhecer os valores precisos dos coeficientes de fricção, e como isto é difícil, a predição do ângulo de hélice visualmente não é possível.

4.2.1.4 O EFEITO DO Nº DE FILETES

O aumento do número de filetes paralelos reduz a área aberta da seção transversal do canal e aumenta a área de contato entre o leito sólido e a rosca. Ambos fatores têm impactos negativos nas performances do transporte de sólidos. Particularmente quando o ângulo de hélice é relativamente pequeno (Figura 48).

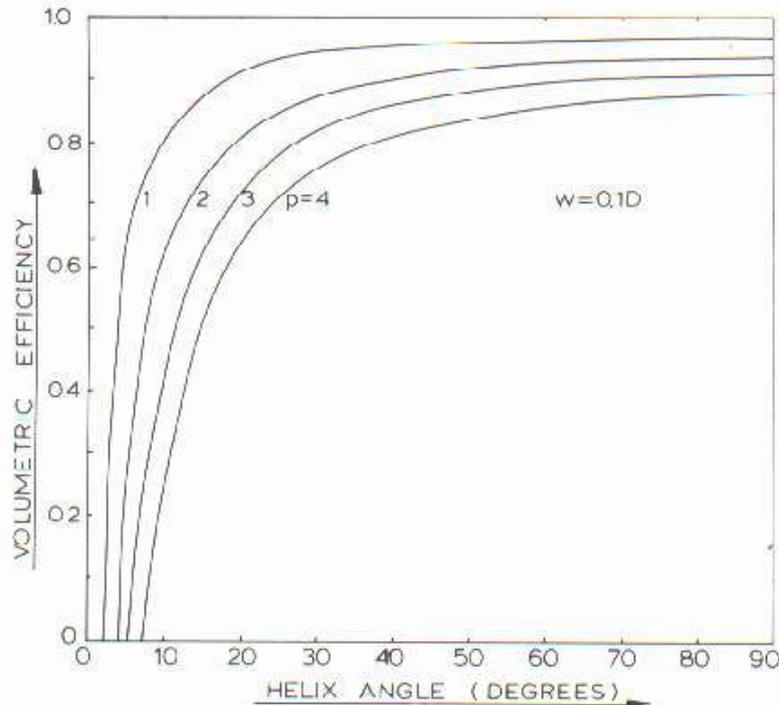


Figura 48. Efeito do ângulo de hélice na eficiência do transporte de sólidos para diferentes nº de filetes paralelos (P) e a uma profundidade de canal. $W = 0,1 D$.

4.2.1.5 O EFEITO DA FOLGA NO FILETE

Em muitos casos, a folga do filete é menor do que o tamanho das partículas do polímero. Além disso, a perda de fluxo de polímero pela folga é menos provável quando as partículas estão compactadas em um leito sólido. Mesmo quando as partículas poliméricas não estejam completamente compactadas, a folga radial, geralmente, não será tão crítica para o transporte de sólidos.

4.2.1.6 O EFEITO DA GEOMETRIA DO FILETE

Muitas instabilidades na extrusão podem ser devido à deformação interna do leito sólido. A deformação interna ocorre mais provavelmente quando o coeficiente de fricção interna do polímero é baixo. Partículas esféricas tendem a ter mais baixos coeficientes de fricção do que as partículas não esféricas e são, assim, mais suscetíveis à deformação interna do leito sólido. Isto pode explicar a diferença, freqüentemente observada, no comportamento de extrusão entre fios *pelletizados* e material *pelletizado* com corte na matriz. No primeiro há a formação de material com maior área de contato (mais cilíndricos) do que os produzidos com sistema de corte na matriz (se este sistema resultar em materiais mais esféricos, pois se verificam, em muitos casos de corte na matriz, formas de lentilhas).

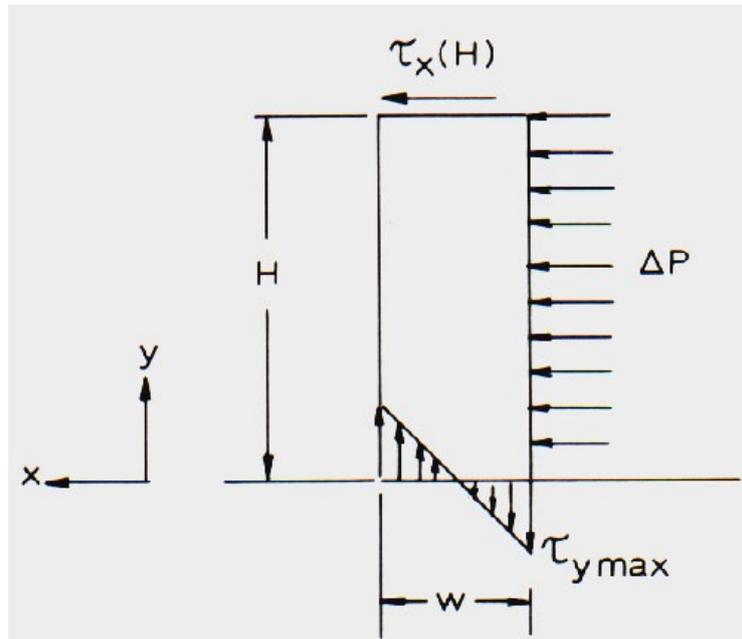


Figura 49. Filete retangular.

A geometria trapezoidal (Figura 49) do filete resulta em maior produção e performance mais estável na extrusão do que um filete retangular (Figura 50), particularmente a altas velocidades de rosca. A geometria trapezoidal do filete é também a melhor em termos de distribuições de tensões.

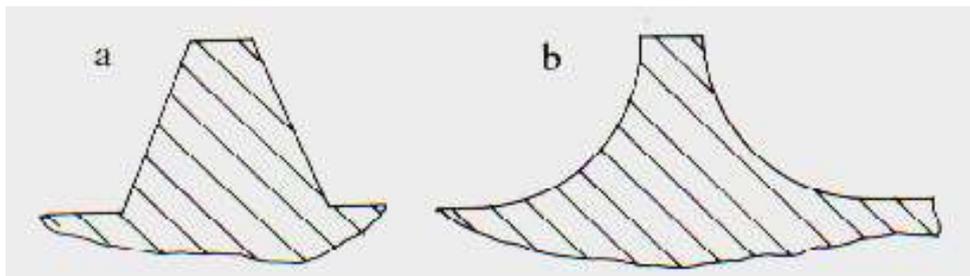


Figura 50. Filete trapezoidal (a) e trapezoidal arredondado (b).

Além disso, a forma trapezoidal, em especial a arredondada (Figura 50 b) diminui a área de contato entre o leito sólido e a rosca. Isto deverá trazer um efeito adicional positivo na performance de sólidos.

4.2.2 OTIMIZAÇÃO PARA PLASTIFICAÇÃO

Parâmetros levados em consideração para otimização da plastificação:

- Ângulo de hélice
- Largura do filete
- N° de filetes
- Folga do filete
- Razão de compressão

Medida de eficiência da plastificação:

- O comprimento total axial de fusão (CTAF)

4.2.2.1 O EFEITO DO ÂNGULO DE HÉLICE

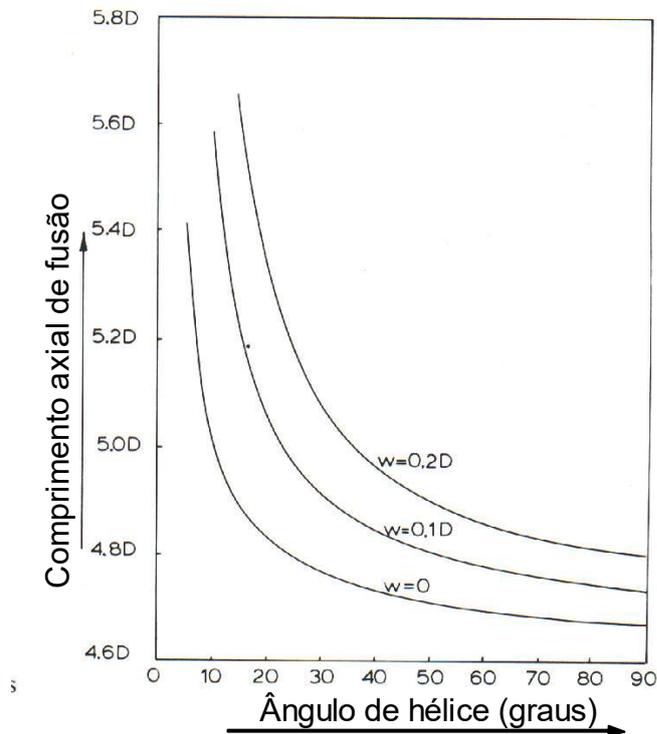


Figura 51. Efeito do ângulo de hélice na plastificação.

- CTAF diminui fortemente com o aumento do ângulo de hélice, para ângulos relativamente pequenos. Para ângulos maiores, o gradiente é menor.
- Poucas melhorias são obtidas para ângulos maiores que 30°
- O CTAF aumenta com a largura do filete (W), particularmente para pequenos ângulos

Pela figura, é possível verificar que não há um ângulo de hélice ótimo, para o qual o comprimento de fusão alcança um mínimo. O comprimento de fusão mais curto seria obtido quando o ângulo de hélice é de 90°, contudo, o comprimento de fusão à 90° é apenas 3% menor do que o comprimento de fusão à 30° e cerca de 8% menor do que o comprimento de fusão à 17,66° (passo quadrado).

Considerando que o ângulo de 90° não produz efeito de arrasto, é pouco compressível aplicar tal ângulo de hélice, extremo, visando a melhor performance na fusão.

4.2.2.2 O EFEITO DE MÚLTIPLOS FILETES

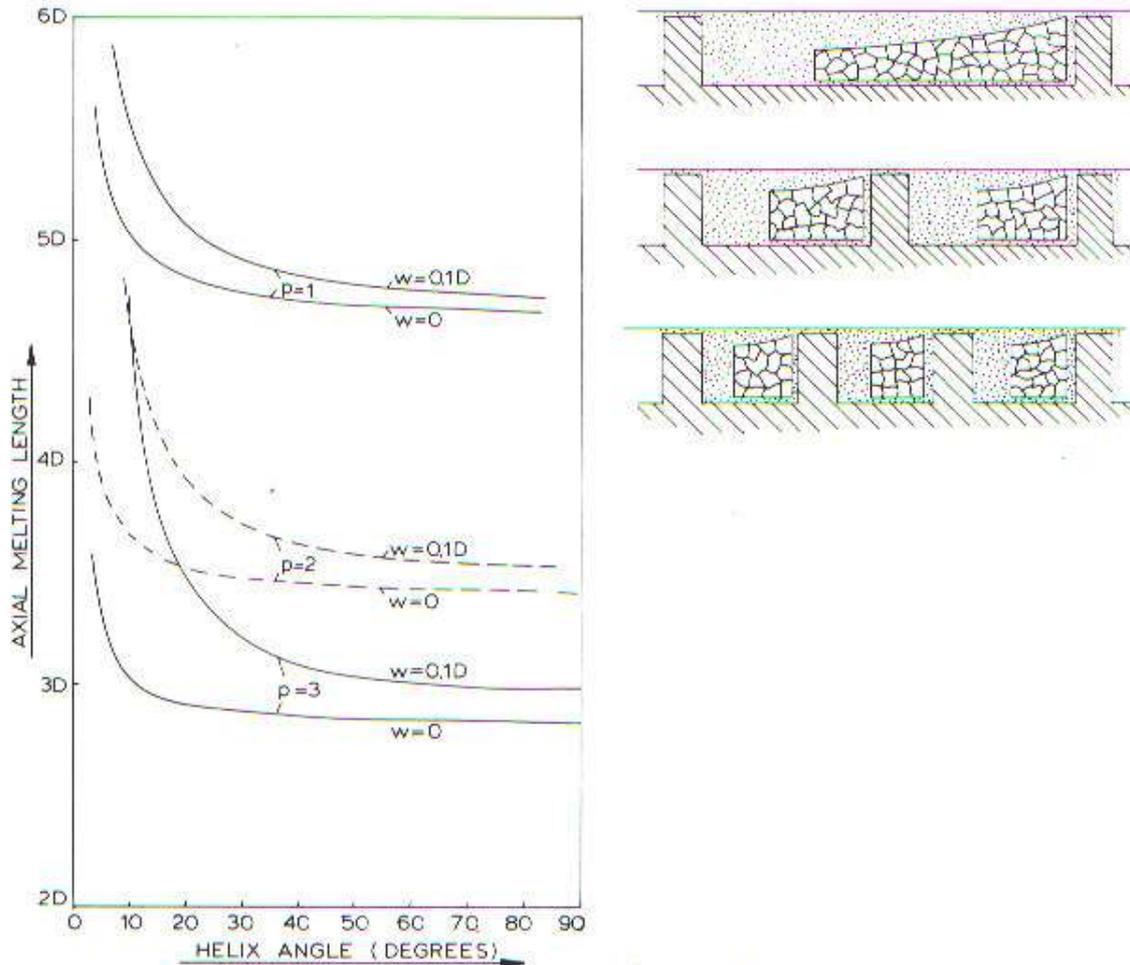


Figura 52. Efeito do número de filetes na plastificação.

A Figura 52 mostra o efeito do ângulo de hélice no comprimento axial de fusão para rosca projetadas com mono, di e tri-filetada.

- O comprimento de fusão pode ser reduzido substancialmente quando o número de filetes é aumentado, contanto que o ângulo de hélice seja suficiente grande.
- O efeito da largura do filete torna-se pronunciado quando o número de filetes (p) aumenta.
- O efeito benéfico de múltiplos filetes pode ser explicado pela redução média do comprimento e, conseqüentemente, da espessura do filme fundido, conforme desenho na Figura 51. Quando o número de filetes é aumentado, a largura do leito sólido individual torna-se menor, resultando em uma diminuição na espessura média do filme. O filme fundido, mais fino, aumentará a geração de calor viscoso melhorando a performance na fusão. Para uma ótima performance na fusão, a geometria mais favorável é a do projeto multi-filetada, com filetes relativamente estreitos e com ângulo de hélice relativamente grande, em torno de 25 a 30°.

O efeito do ângulo de hélice, a largura do filete e o número de filetes podem também ser analisados em termos de eficiência volumétrica da rosca extrusora. Ela é definida simplesmente com o volume do canal dividido pelo volume total do canal mais o filete.

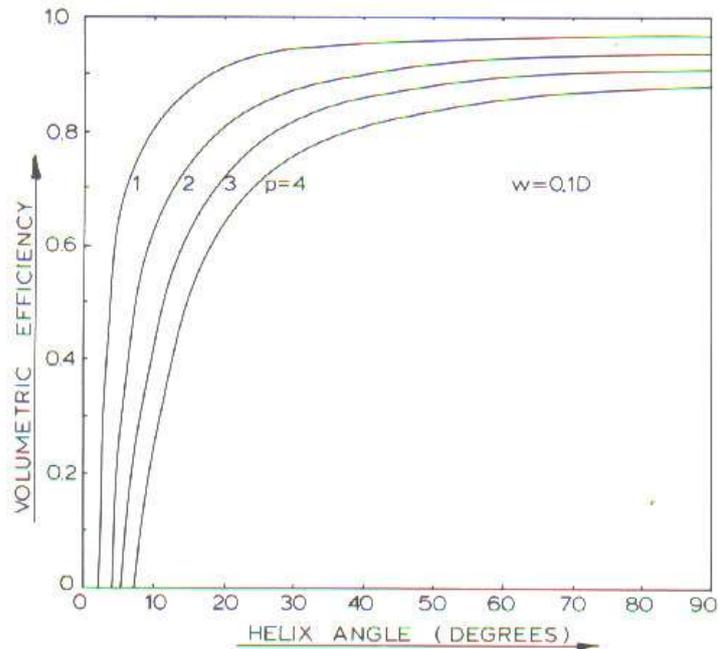


Figura 53. Efeito do número de filetes e do ângulo de hélice na eficiência volumétrica .

A Figura 53 apresenta a eficiência volumétrica como função do ângulo de hélice para vários números de filetes (p).

- Um aumento agudo da eficiência volumétrica é observado para pequenos ângulos de hélice, sendo mais para ângulos maiores. A mais alta eficiência é obtida quando o ângulo é 90°. Quando o número de filetes (p) é aumentado para pequenos ângulos de hélice, a eficiência volumétrica cai consideravelmente.
- Com o passo quadrado (ângulo de 17,66°), a eficiência volumétrica é cerca de 85% para rosca mono-filetada, caindo para cerca de 50% para rosca com quatro filetes. Quando o ângulo for de 30%, a eficiência volumétrica é cerca de 95% para p=1, e mais ou menos 75% para p=4.

4.2.2.3 O EFEITO DA FOLGA NO FILETE

A taxa de fusão diminui momentaneamente com o aumento da folga radial conforme a figura abaixo.

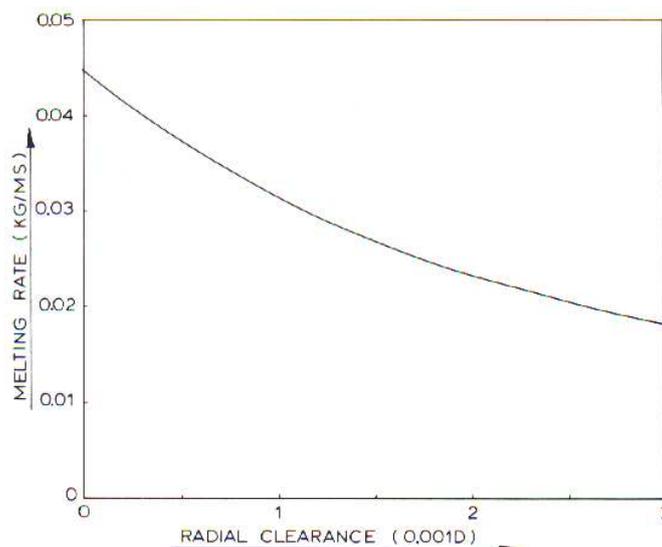


Figura 54. Efeito da folga do filete no processo de plastificação.

- Considerando que a folga padrão é de $0,001D$, uma duplicação desta provoca uma redução de aproximadamente 25% na taxa de fusão.
- Triplicando-se esta folga, há uma redução de aproximadamente 35%.
- Fica evidente que um desgaste na zona de plastificação da extrusora tem um efeito negativo na performance de fusão, sendo importante fazer com que a folga radial, nesta região, esteja dentro de limites razoáveis.
- Sintomas de extrusora com desgaste: temperatura, pressão e vazão não uniformes (instabilidade).
- Se estes problemas ocorrem, é boa prática checar o desgaste na rosca e no cilindro. Se a folga for maior do que 2 - 3 vezes a folga padrão, a rosca e/ou cilindro devem ser recuperados ou substituídos.
- O desgaste na seção de compressão da rosca é freqüentemente causado por grandes razões de compressão.

4.2.2.4 O EFEITO DA RAZÃO DE COMPRESSÃO (RC)

RC = Profundidade do canal na seção alimentação/ profundidade do canal da seção de dosagem

Se a compressão for muito rápida, a fusão pode ser insuficiente. Isto geralmente causa obstrução (*plugging*). Obstruções causarão oscilações na produção.

O comprimento mínimo permitido para a seção de compressão pode ser determinado em função da razão máxima de compressão. O comprimento da seção de compressão, deve ser longo para evitar obstrução.

A figura 55 relaciona o comprimento mínimo de seção de compressão como função de razão máxima de compressão.

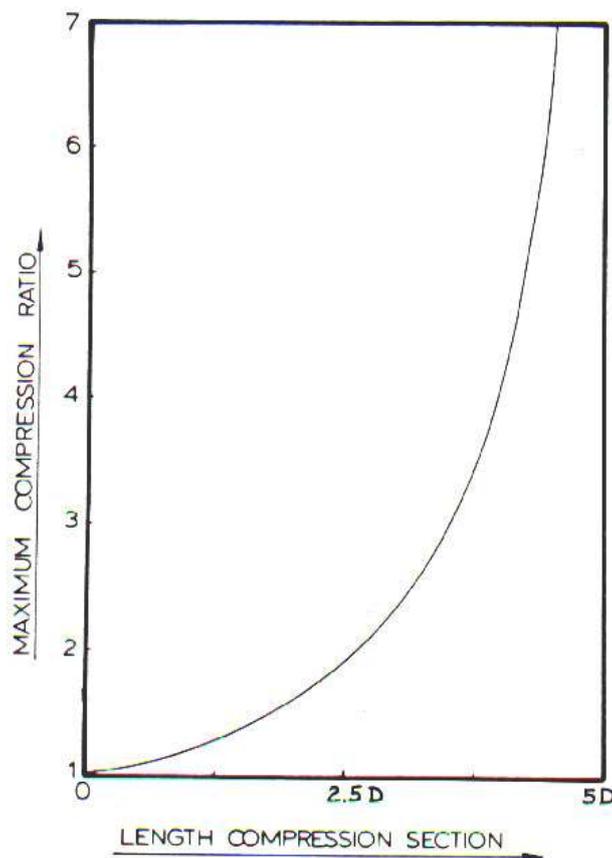


Figura 55. Relação entre razão de compressão e o comprimento mínimo de compressão.

Uma perigosa combinação no projeto da seção de compressão ocorre quando é usada uma grande razão de compressão (RC) e um curto comprimento desta seção. Isto resultará muito facilmente no "pluggin". Roscas de compressão rápida devem ser evitadas por esta razão.

Um dos mitos no projeto de rosca é que certos polímeros, como o nylon, requerem uma compressão muito rápida na rosca, de forma a extrudar apropriadamente (1D). Tal rosca pode trabalhar, mas se a maioria da fusão ocorrer antes da seção de compressão.

Do ponto de vista funcional, roscas de compressão rápida não fazem muito sentido, uma vez que são suscetíveis ao desgaste, gerando oscilações.

4.2.3 OTIMIZAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE FUNDIDO

- A η do polímero dependerá da γ^* e da T na rosca.
- A profundidade ótima depende do diâmetro, da velocidade da rosca, do gradiente de pressão e do ângulo de hélice, entre outros fatores.
- O ângulo ótimo da hélice é apenas uma função do tipo de material e da largura do filete.
- A profundidade do canal ótima é dependente das variáveis: tipo de polímero, largura do filete, velocidade da rosca, diâmetro desta e gradiente de pressão.
- Se considerarmos o comportamento do material como newtoniano erros muito grandes podem acontecer. Portanto, é muito importante levar em consideração o **comportamento pseudoplástico** dos polímeros fundidos quando estudamos o fluxo destes.

4.2.4 OTIMIZAÇÃO PARA O CONSUMO DE ENERGIA

Em alguns casos, a otimização para o consumo de energia pode ser mais importante do que a otimização para a produção.

Este é o caso quando o consumo de energia é excessivo, causando aquecimento elevado do polímero com conseqüente aumento da probabilidade de ocorrer degradação.

Alguns polímeros tem propriedades inerentes que resultam em elevado consumo de energia. Um exemplo típico é o PEBD linear. A causa do seu elevado consumo de energia é geralmente a alta viscosidade do polímero fundido. O problema pode ser particularmente severo se a viscosidade permanece alta a elevadas taxas de cisalhamento.

Os polímeros mais difíceis com relação ao consumo de energia são os polímeros com baixo IF. Tais polímeros requerem atenção especial no projeto da rosca com o objetivo de minimizar o consumo de energia. Ao otimizar para o consumo deve estar relacionado a um determinado nível de produção, minimizar o consumo de energia sem considerar a produção não faz sentido.

O consumo de energia é ótimo quando a razão entre o consumo de energia e produção atinge um valor mínimo.

Esta razão é chamada de **consumo específico de energia** (CEE). Ela é a energia mecânica gasta por massa do material processado e é normalmente expressa em Kwh/Kg ou Hph/lb.

Valores elevados de CEE significam uma grande quantidade de energia gasta por unidade de massa polimérica, isto resultará em elevado aumento de temperatura e possibilidade de degradação. Portanto, a geometria ótima da rosca para consumo de energia é aquela geometria para a qual a razão entre o consumo de energia e produção atingem um valor mínimo.

4.3 TIPOS DE ROSCAS EXTRUSORAS

Há uma grande variedade de tipos de roscas extrusoras, que são modificações da rosca padrão. Alguns destes tipos serão apresentados a seguir.

4.3.1 ROSCA PADRÃO UNIVERSAL

São chamadas de “universais” as roscas que possuem as características geométricas relacionadas a seguir. São tais características que dão à rosca capacidade de transportar e plastificar vários tipos de resinas, com uma velocidade de produção e precisão de controle do processo, aceitáveis, embora não ótimos:

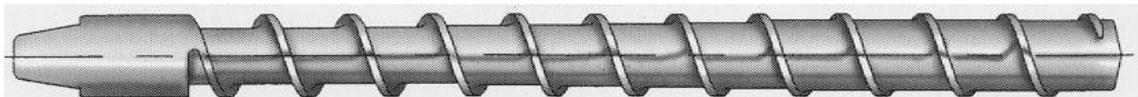


Figura 56. Rosca Universal.

- Passo constante
- Passo = diâmetro
- Comprimento total (relação L/D): 20 a 30 D;
- Comprimento zona de alimentação: 4 a 8 D;
- Comprimento zona de dosagem: 6 a 10 D;
- Número de filetes: 1;
- Passo da rosca: 1D (passo quadrado);
- Ângulo de hélice: 17,66°;
- Largura do filete: 0,1D;
- Profundidade do canal na zona de alimentação: 0,10 a 0,15 D;
- Taxa de compressão: 2 a 4

MODIFICAÇÕES DA ROSCA UNIVERSAL

Para que determinados materiais fossem processados de forma mais eficiente, foram, ao longo do tempo, desenvolvidas variações da rosca universal. Algumas das mais importantes são apresentadas a seguir (e mostradas na figura 57):

4.3.2 ROSCA COM PASSO VARIÁVEL

Permite usar ângulos de hélice otimizados para cada seção. Pode ser crescente ou decrescente. O passo decrescente tem a mesma função da redução da profundidade dos canais, ou seja, comprimir o material. Roscas para extrusão de borrachas tem canais de profundidade constante e passo decrescente. Quanto maior a profundidade dos canais menos aquecido por cisalhamento será o polímero. Para que se mantenha a grande profundidade do canal até o final da rosca e haja compressão do material, o passo deve ser decrescente. Além destas características, roscas para elastômeros devem ser curtas, geralmente com relação L/D de 10:1, para que o material atrite o mínimo possível com o cilindro, evitando que o material fique elástico ainda dentro do cilindro.

Roscas de passo largo e crescente reduzem a troca de calor entre o polímero e o cilindro e possuem reduzida capacidade de plastificação, mas têm o perfil mais adequado para processar PELBD (polietileno linear de baixa densidade).

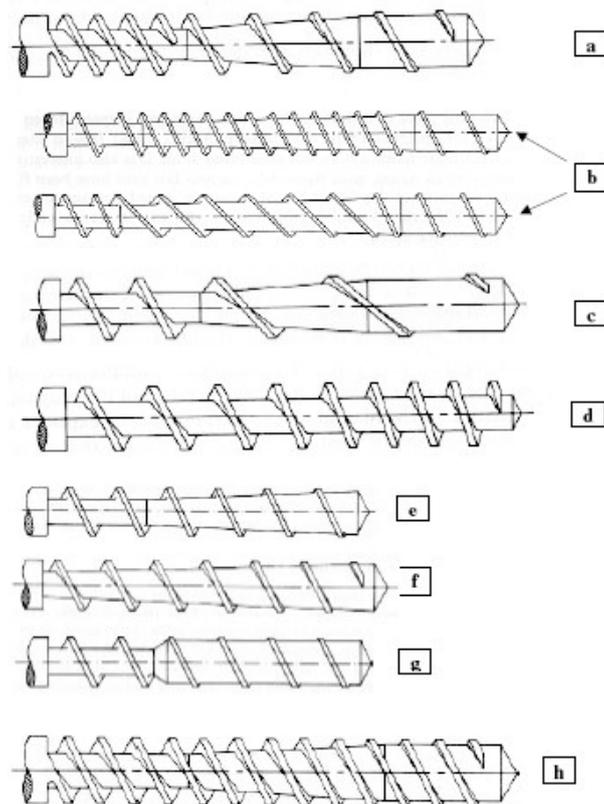


Figura 57. Modificações da Geometria da Rosca Universal.

(a) com filete adicional na zona de alimentação; (b) com filete adicional na zona de plastificação; (c) com passo crescente; (d) com passo decrescente; (e) sem seção de dosagem; (f) sem seção de dosagem nem de alimentação; (g) de compressão rápida; (h) multifiletada convencional.

4.3.3 ROSCA SEM AS SEÇÕES DE DOSAGEM E DE ALIMENTAÇÃO

Existe apenas a seção de compressão. Permite compressão muito gradual do polímero, o que reduz aprisionamento de ar, flutuações de pressão e de vazão e aumenta a qualidade do extrudado. Muito usada para processar Nylon.

4.3.4 ROSCA DE COMPRESSÃO RÁPIDA

Possui um seção de compressão extremamente curta, geralmente menor que 1D.

4.3.5 ROSCA MULTIFILETADA CONVENCIONAL

Existe um grande número de geometrias de rosca usando mais de um filete. Filetes adicionais podem executar as mesmas funções do filete principal. Este tipo de geometria é chamada de rosca multifiletada convencional, pois em outros tipos de configurações os filetes adicionais funcionam de forma diferente do filete principal.

Vantagens:

- simetria dos filetes reduz tendência de deflexão da rosca por mudanças bruscas de pressão ao longo do canal;
- entrada de material mais regular;
- melhor plastificação.

4.3.6 ROSCA COM FILETE ADICIONAL APENAS NA ZONA DE ALIMENTAÇÃO

Serve para suavizar a flutuação de pressão na zona de alimentação, causada pela entrada do filete no fluxo de material que vem do funil e balancear forças, evitando a deflexão da rosca. Porém, reduz o transporte de sólidos, pois diminui o volume do canal.

4.3.7 ROSCAS COM FILETE DE BARREIRA

No início da rosca, um filete adicional, chamado de filete de barreira, é introduzido no canal. A folga entre o filete de barreira e o cilindro é geralmente maior do que a folga entre o filete principal e o cilindro, pois deve haver espaço suficiente para a passagem do material plastificado, mas impedindo a passagem de partículas sólidas. Assim, como mostra a figura 58, o filete de barreira forma uma “separação de fases”, isolando a região sólida da região plastificada. Assim a rosca tem um canal “sólido” e um canal “plastificado”. O canal “sólido” vai tendo sua seção transversal diminuída ao longo da rosca, até zero, na ponta mais próxima da matriz, onde o material plastificado ocupará todo o canal. Esta geometria assegura melhor plastificação, pois não há presença de partículas sólidas em meio ao material fundido. Outra vantagem é a melhor mistura conseguida pela forçada passagem do material pela estreita folga do filete de barreira.

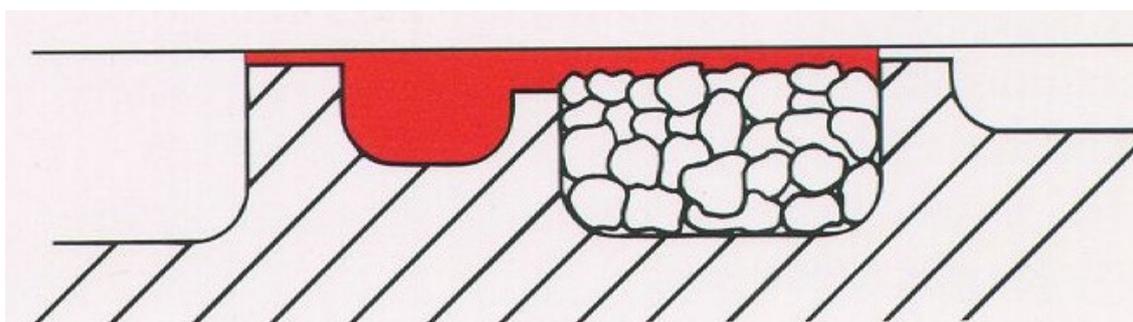


Figura 58. O filete menor, de barreira, separa o material já fundido do ainda sólido, aumentando a eficiência da plastificação.

São inúmeros os perfis desenvolvidos para roscas de barreira, entre os quais se destacam os projetos de *Maillefer* e de *Barr*:

4.3.8 ROSCA TIPO MAILEFFER

Ângulo de hélice do filete de barreira é maior do que o do filete principal. Esta geometria permite uma contínua e gradual diminuição do canal de material sólido. A desvantagem é que o canal vai tendo sua largura reduzida, correspondendo a uma redução na taxa de plastificação, uma vez que ela é determinada diretamente pela largura da região sólida dentro do canal.

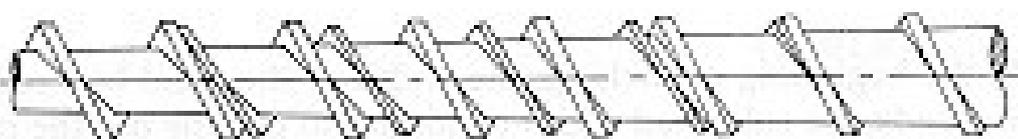


Figura 59. Rosca tipo *Maillefer*

4.3.9 ROSCA TIPO BARR

Sua parte inicial é idêntica à rosca *Maileffer*, porém quando o canal com material fundido está suficientemente largo, o filete de barreira torna-se paralelo ao principal. A área da seção transversal do canal de sólidos é então reduzida, ao mesmo tempo que é aumentada a profundidade do canal fundido. A vantagem é que o canal de material sólido não é constantemente reduzido, mas se mantém constante durante uma relativamente grande parte da rosca, aumentando a interface do canal de sólidos com o cilindro, o que proporciona melhor performance de plastificação.

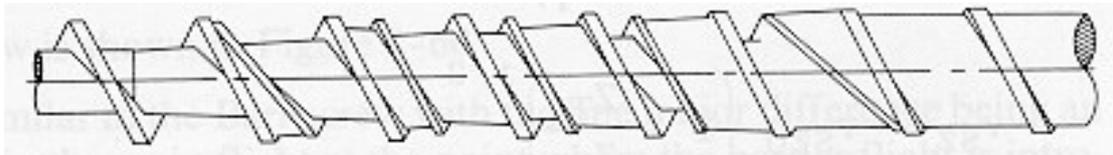
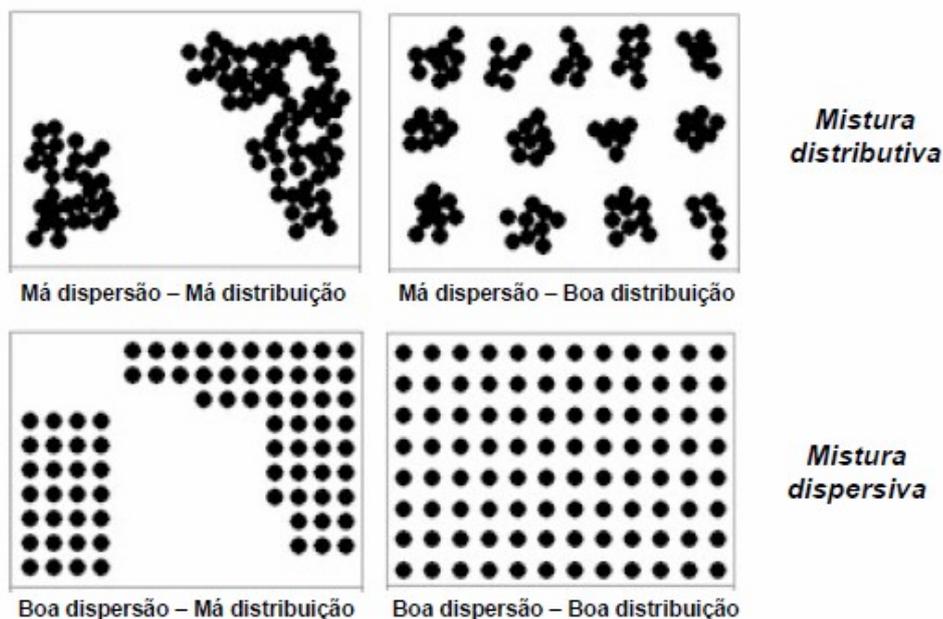


Figura 60. Rosca tipo *Barr*

4.3.10 SEÇÕES MISTURADORAS (ou de mistura distributiva)

Roscas com elementos de mistura: processo cujo objetivo é melhorar a uniformidade de uma composição, o mecanismo básico é induzir o movimento físico do material. Quanto maior o tempo de residência do material na zona de transporte de fundido, maior será a homogeneização.



Conforme já mencionado, a capacidade de mistura de extrusoras com roscas convencionais é relativamente limitada. Desta maneira, várias modificações são feitas na rosca, em seções apropriadas, para melhorar esta característica. Uma destas modificações são as chamadas seções de mistura distributiva. Seus elementos misturadores geram perturbações na velocidade e na direção do fluxo do material, promovendo sua mistura.

Este tipo de mistura é necessário em várias situações, entre as quais se destacam:

- para possibilitar a extrusão de blendas (misturas de duas ou mais resinas);
- para misturar perfeitamente aditivos na resina principal;

- para homogeneizar cores (uso de pigmentos), evitando que o extrudado tenha faixas de colorações diferentes.

Os principais tipos de seções misturadoras são:

- Pinos de mistura: distribuídos radialmente em uma seção que corta um canal transversalmente à rosca;
- Dulmage: canais estreitos e paralelos, inclinados em relação à linha de centro da rosca;
- Abacaxi: vários elementos em forma de losango dispostos em linhas ao longo da rosca e radialmente, preenchendo inteiramente uma larga seção;
- Filete ranhurado: o filete da rosca é ranhurado em várias seções.

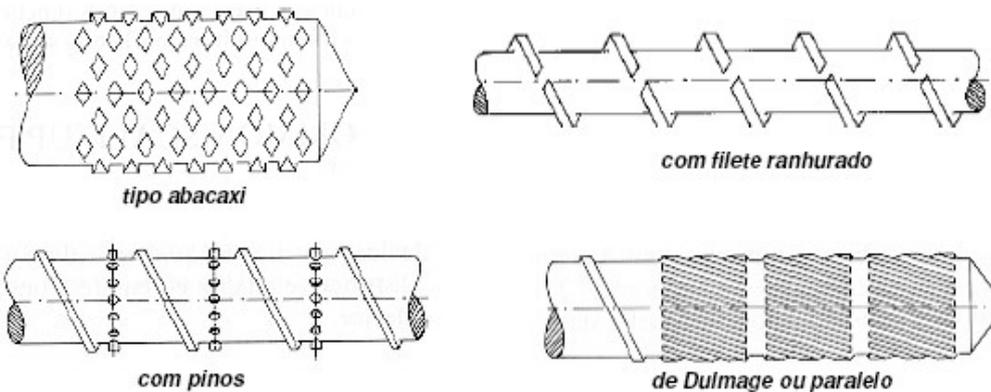


Figura 61. Seções Misturadoras.

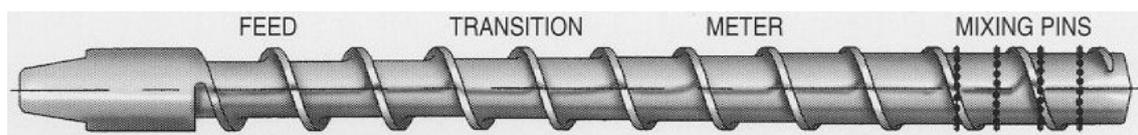


Figura 62. Rosca convencional com seção misturadora (com pinos).

4.3.11 SEÇÕES CISALHADORAS (ou de mistura dispersiva)

Outro tipo de modificação da rosca com função de melhor homogeneizar o material. São usadas quando aglomerados ou géis devem ser quebrados, separados. Para isto, adiciona-se à rosca uma seção contendo filetes de barreira. Na estreita folga entre o filete e o cilindro, o material sofre uma tensão de cisalhamento alta o suficiente para desmanchar estas partículas.

Este tipo de misturador é indicado nos casos em que os misturadores distributivos não são eficientes, como:

- quando for fundamental se desmanchar partículas de material não fundido no processamento de produtos de pequena espessura, como, filmes finos, rafia e fios, evitando o entupimento da matriz ou o rompimento do produto (rasgamento no caso dos filmes);
- quando for necessário desmanchar pigmentos de cor ou outros tipos de aditivos, dispersando-os na massa plastificada; podem ser utilizados em conjunto com misturadores distributivos (primeiro os cisalhantes, depois os distributivos).

Os tipos mais comuns são:

- Maddock: possui canais ângulo de hélice de 90°, ou seja, paralelos ao comprimento da rosca. O canal de entrada é fechado no fim da rosca, para que o material plastificado entre por eles e seja obrigado a passar pela folga entre o filete e o cilindro, entrando então no canal de saída, para continuar seu

caminho até a rosca. O problema é que o fluxo desenvolvido não é de arrasto e há muito consumo de pressão.

- Maddock espiral (Egan): semelhante ao anterior, mas os canais tem ângulo de hélice diferente de 90°, para se conseguir o transporte por arrasto, consumindo menos pressão.

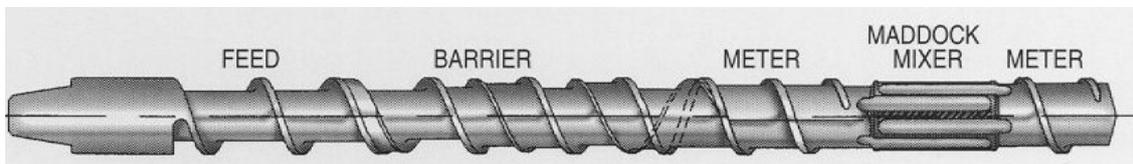


Figura 63. Rosca de barreira tipo DSBM, com seção cisalhante de Maddock.

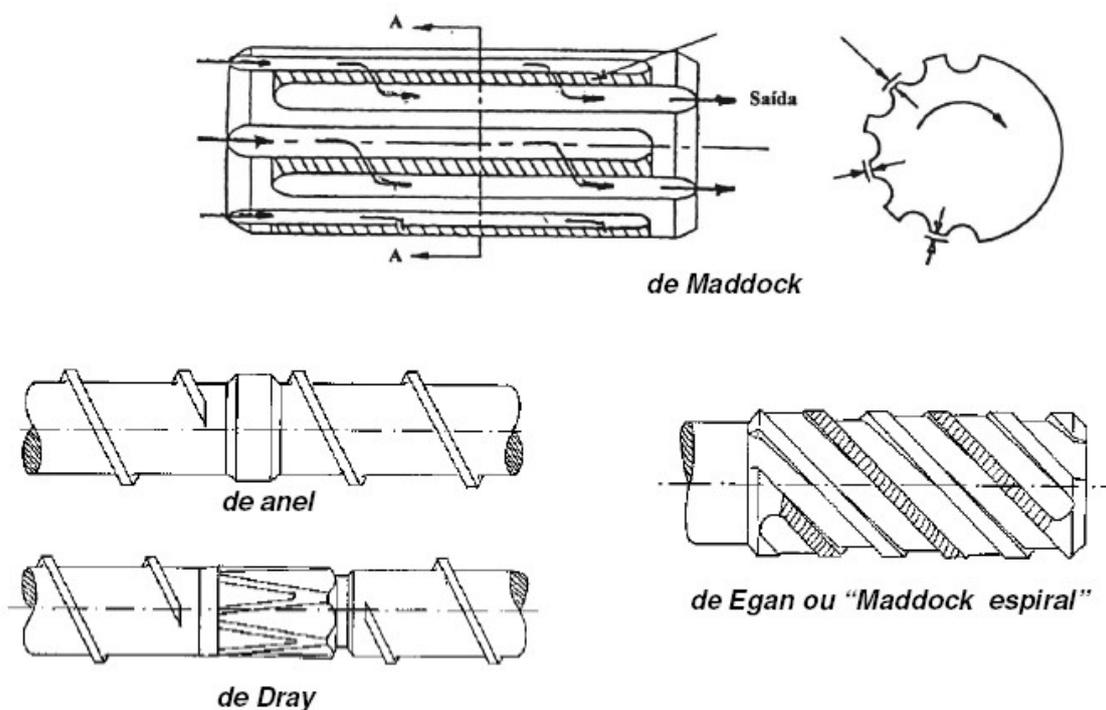


Figura 64. Seções cisalhantes.

4.3.12 ROSCA PARA DEGASAGEM

O projeto da rosca é muito crítico para o funcionamento apropriado da extrusora com degasagem. Existem situações em que a própria resina pode escapar pelas aberturas, assim a rosca deve ser projetada para que não haja pressão positiva no polímero na seção onde se localiza a abertura. Isso levou ao desenvolvimento da rosca de dois estágios. Estas roscas tem duas zonas de compressão separadas por uma zona de descompressão/extração de gases. São como se fossem duas roscas de um estágio montadas em série.

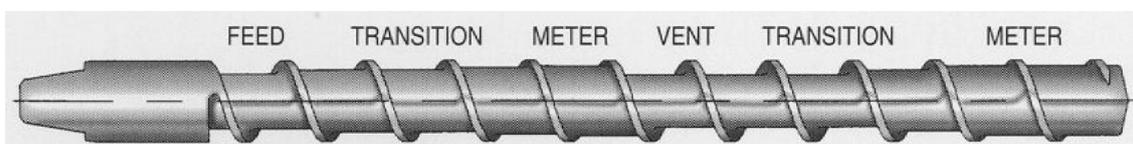


Figura 65. Rosca de dois estágios, para desvolatilização.

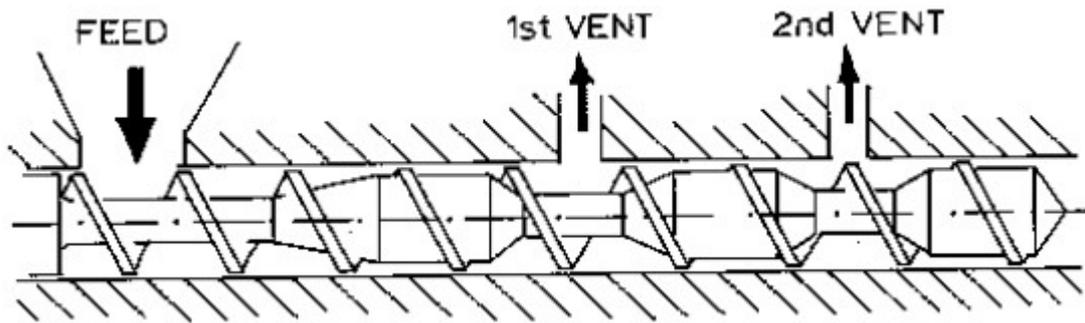


Figura 66. Corte de um cilindro mostrando uma rosca de dois estágios com duas saídas de degasagem.

A capacidade de remoção de voláteis das máquinas com uma rosca é limitado em comparação com as máquinas de duas rosca. Com uma única abertura, uma máquina de uma rosca geralmente reduz apenas uma fração 1% dos voláteis, dependendo, é claro, do sistema polímero/solvente. Por isso, este tipo de máquina é, algumas vezes, equipada com mais aberturas (figura 66), mas há a desvantagem de se ter uma rosca muito comprida, criando problemas no manuseio da rosca e aumentando a probabilidade de problemas na extrusora. Se grandes quantias de gases devem ser extraídas uma extrusora com duas rosca tem menor custo/benefício.

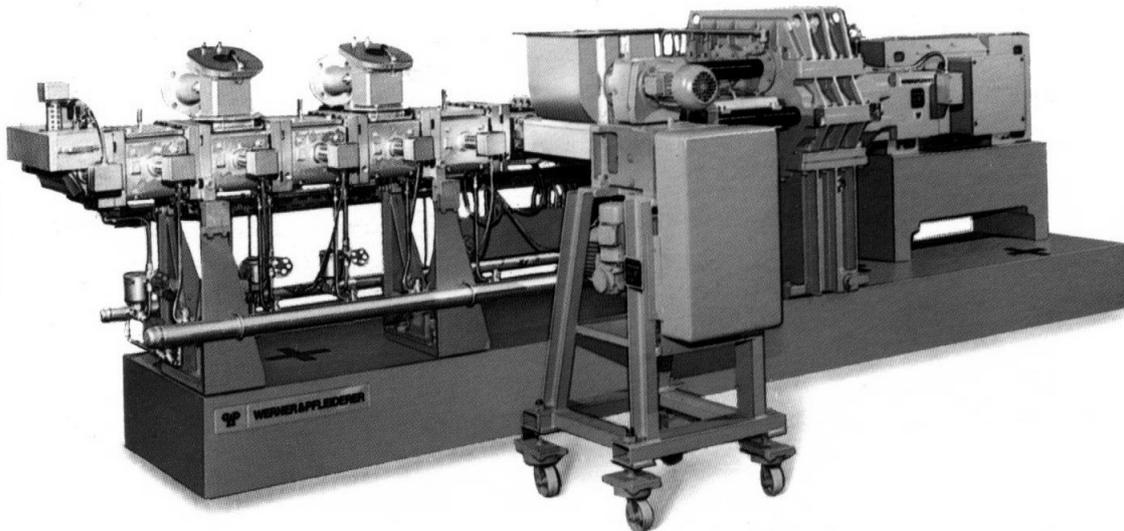


Figura 67. Extrusora para desvolatização com duas aberturas.

4.3.13 DESVOLATIZAÇÃO EM CASCATA

Dois extrusoras são montadas em cascata. A primeira, normalmente multirosca, é usada para transporte de sólidos, plastificação e alimentação. O material, então, passa por gravidade, para a seção de alimentação da segunda extrusora, geralmente de rosca simples, que transporta o material plastificado e o conforma. A desvolatização acontece na passagem do material de uma extrusora para a outra.

A maior vantagem é que o controle de vazão do primeiro estágio para a capacidade de geração de pressão do segundo estágio é bem melhor do que no sistema de desvolatização convencional. A óbvia desvantagem é o maior custo deste sistema em relação ao convencional.

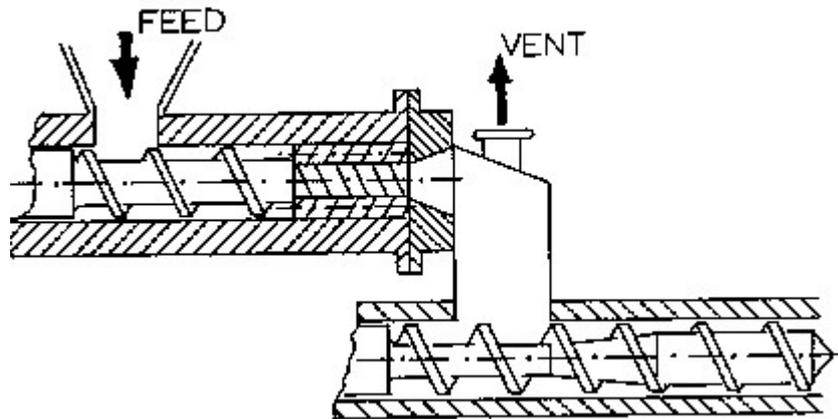


Figura 68. Extrusora desvolatizadora tipo cascata.

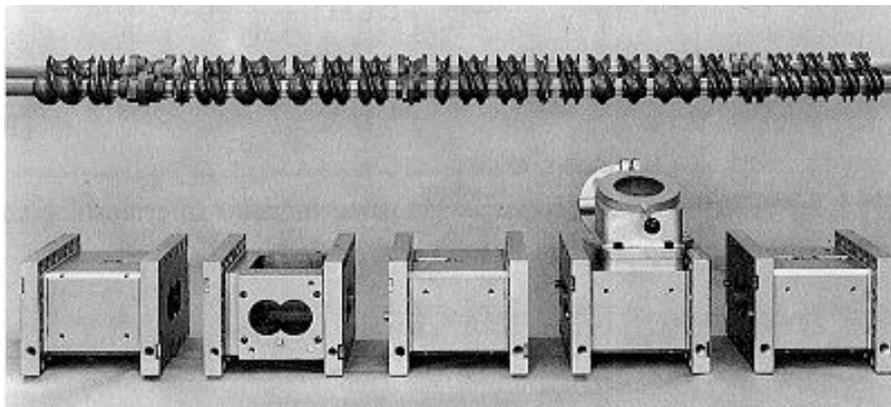


Figura 69. Módulos para montagem de roscas e cilindros.

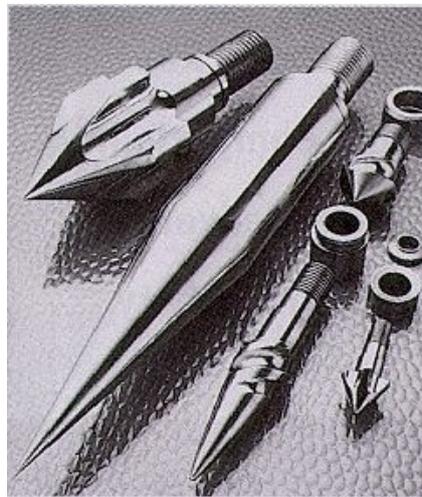


Figura 70. Pontas de rosca com diferentes características geométricas, para atender os requisitos de processamento de cada tipo de resina.

4.3.14 EXTRUSORAS DUPLA ROSCA

Estas extrusoras contam com duas roscas ao invés de uma única rosca no conjunto de plastificação. As roscas são paralelas podendo ter formato cilíndrico ou cônico. As principais aplicações são para:

- Produção de perfis, principalmente PVC rígido;
- Preparo de composições;
- Desvolatilização de compostos;
- Reações químicas.

Características gerais das extrusoras usadas para perfis:

- Possuem filetes muito próximos entre si (considerando as duas roscas);
- Operam a baixas velocidades (ao redor de 20 rpm);
- Possuem algumas vantagens em relação a extrusoras de rosca simples:
 - Mais fácil de alimentar;
 - Melhor transporte positivo;
 - Processa bem materiais que na rosca simples são de difícil alimentação (pós, materiais com baixo coeficiente de fricção, etc);
 - Possuem menor tempo de residência;
 - Tem bom controle de temperatura.

Na extrusão de perfis roscas do tipo completamente *intermeshing* (intercruzadas) e contra-rotacionais são as mais utilizadas.

CONFIGURAÇÕES

Existem vários tipos de máquinas com duas roscas, cada qual destinada a um conjunto diferente de aplicações:

- Intercruzadas
 - co-rotativas
 - contra-rotativas (cônicas ou cilíndricas)
- Não-intercruzadas
 - co-rotativas
 - contra-rotativas
 - coaxiais (raramente encontradas)

Em termos gerais, as co-rotativas (intercruzadas e não-intercruzadas) são empregadas apenas como preparadoras de matéria-prima, misturando aditivos à resina principal ou atuando como reatores de polimerização. Embora o mecanismo de transporte por arrasto seja semelhante ao que ocorre nas máquinas de rosca simples, este tipo de máquina é mais eficiente nesta aplicação porque a cada rotação o material é jogado de uma rosca para outra. Ou seja, sofre maior cisalhamento ao percorrer um caminho maior dentro do cilindro em relação a um cilindro de mesmo comprimento de uma máquina de rosca simples.

Já as extrusoras de parafusos contra-rotativos intercruzados operam com um mecanismo de transporte diferente das extrusoras monofuso e dos demais tipos de extrusoras bifuso. Quando as roscas giram, o filete de uma penetra no canal da outra fechando, formando uma cavidade fechada que se move para frente. Desta forma, o material é empurrado em direção à matriz, sofrendo um mínimo de atrito. Este mecanismo de transporte é chamado de deslocamento positivo. Este funcionamento permite que o material seja aquecido quase que integralmente pelas resistências do cilindro, assegurando um aquecimento muito mais gradual e controlado do que em máquinas onde a dissipação viscosa de calor devido ao cisalhamento tem importância significativa no aquecimento do material. Além disso, nem toda matéria-prima possui propriedades friccionais favoráveis para o tipo de transporte efetuado por máquinas de rosca simples. Quando o material apresenta-se em forma de pó, apenas máquinas de rosca dupla intercruzadas são capazes de efetuar o transporte do polímero sólido, pois o pó não consegue ser arrastado.

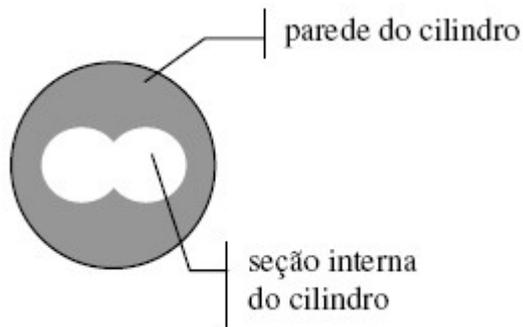


Figura 71. Seção transversal de um cilindro de extrusora de rosca dupla.

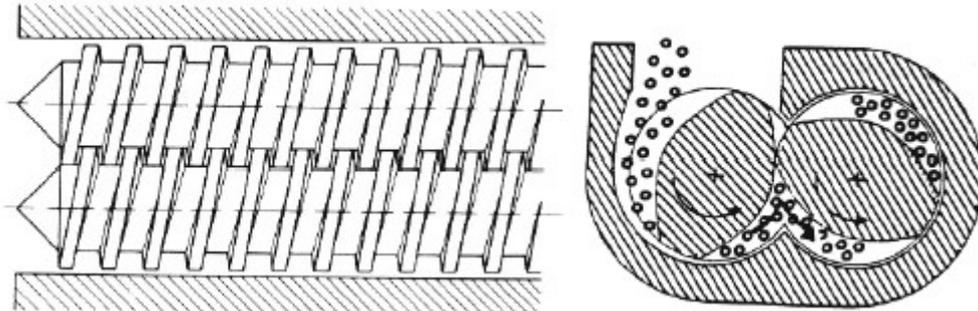


Figura 72. Extrusora de rosca dupla intercruzada co-rotativa.

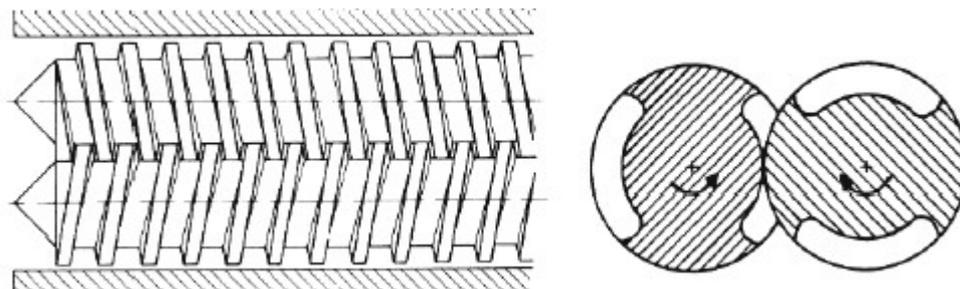


Figura 73. Extrusora de rosca dupla intercruzada contra-rotativa.

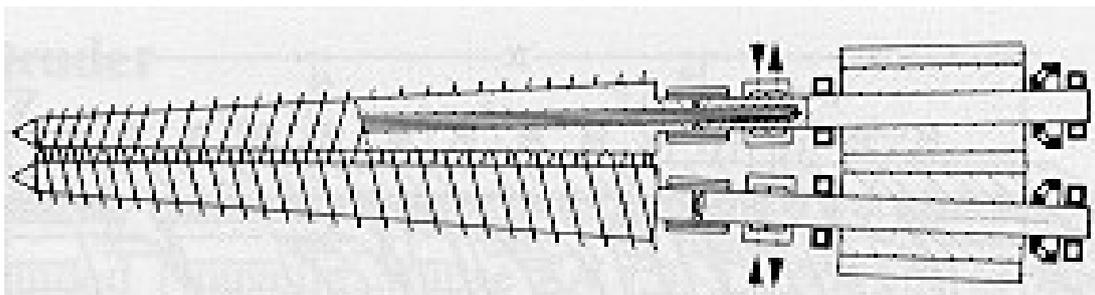


Figura 74. Extrusora de rosca cônica intercruzadas em contra-rotação.

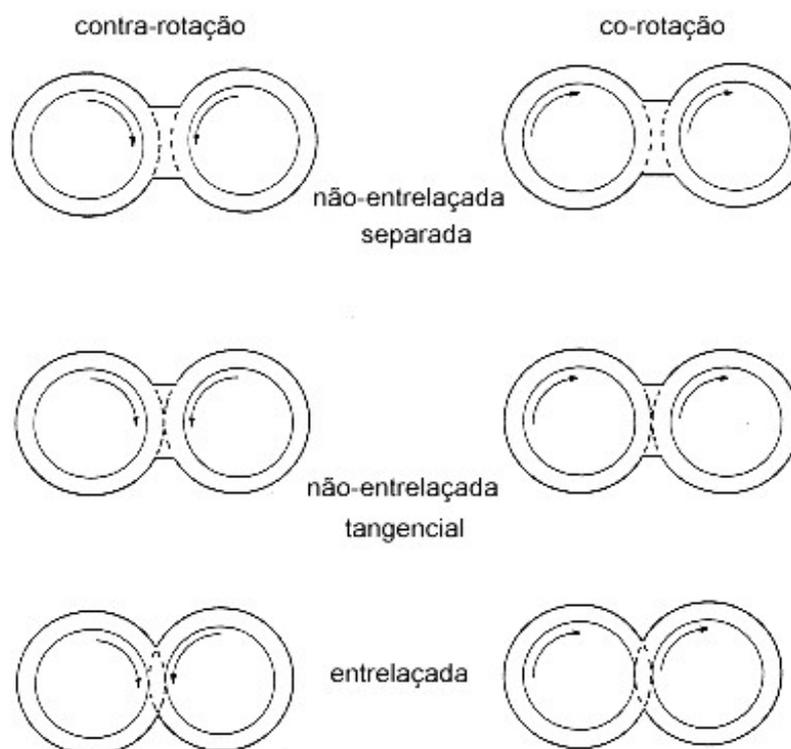


Figura 75. Diversas configurações de extrusoras de rosca dupla, abrangendo duas classificações: quanto ao sentido de rotação e quanto ao grau de entrelaçamento (intercruzamento). Além das já citadas máquinas com roscas intercruzadas e não intercruzadas, também é mostrada uma configuração chamada de tangencial.

Para o caso de composições, desvolatilização e reações químicas em geral são utilizadas rosca do tipo *intermeshing* co-rotacionais que permitem alta velocidade (300 até 1000 rpm).

Extrusoras não-*intermeshing* podem também ser usadas para este mesmo propósito. O mecanismo destas roscas difere das *intermeshing* e tem baixo deslocamento positivo.

Nas roscas simples o transporte positivo ocorre por arrasto. Na zona de transporte de sólidos se deve ao arrasto friccional, na zona de transporte de fundido se dá por arraste viscoso. A maior parte do mecanismo de transporte se deve a propriedades friccionalis do polímero. Já nas roscas duplas *intermeshing* ocorre o deslocamento positivo. O grau de deslocamento positivo dependerá da proximidade dos filetes das duas roscas. Quanto mais próximas (completamente *intermeshing*), mais positivo o deslocamento. Roscas do tipo contra-rotacional produzem mais deslocamento positivo que as co-rotacionais *intermeshing*. Como é impossível produzir roscas com folga zero, fluxos de vazamento podem reduzir o grau de deslocamento positivo.

Os parâmetros de velocidades de roscas simples e de roscas duplas também diferem, nas roscas simples o perfil de velocidade é simples e bem definido; nas roscas duplas o perfil de velocidade é complexo, difícil de descrever. Este modo complexo do perfil de velocidade traz algumas vantagens, como boa mistura, boa transferência de calor, grande capacidade de fusão, bom controle de temperatura da massa.

4.4 BOMBA DE POLÍMEROS OU DE ENGRENAGENS

Este é um componente que pode ser agregado a um sistema de extrusão, geralmente entre a extrusora e a matriz no intuito de eliminar variações de espessura do produto devido à variação de pressão, ou seja, a pulsação de pressão gerada pela extrusora. É de alto custo, mas de baixa necessidade de manutenção, seu uso se justifica quando as tolerâncias dimensionais do produto são muito estreitas.

A utilização de uma bomba de engrenagens consequentemente gera a necessidade de um projeto diferenciado de rosca extrusora, ou seja, deve ser projetada uma rosca com muito baixa relação de compressão, pensada exclusivamente para o transporte e plastificação do polímero, ficando a pressurização da matriz por conta da bomba de engrenagens.

Um aspecto importante no uso das bombas de engrenagens é que deve haver um sistema automático de controle de uma pressão mínima na sucção da bomba para liberar seu uso, isto porque a lubrificação interna da bomba e centragem dos elementos propulsores (engrenagens) é realizada pelo polímero fundido bombeado pela extrusora. Ou seja, enquanto a extrusora não for ligada e alimentar polímero fundido a uma pressão mínima na sucção da bomba, a mesma não consegue ser acionada, da mesma forma, durante o funcionamento, se a pressão de sucção baixar desta mínima, a bomba desliga automaticamente.

Na figura 75A, uma vista em corte esquemática de uma bomba de engrenagens instalada num sistema de extrusão, na figura 75B a bomba e engrenagens em detalhe.

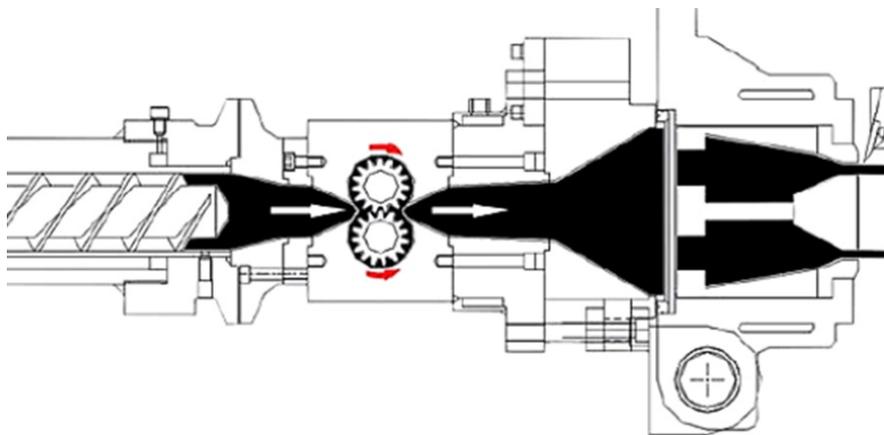


Figura 75A – Bomba de engrenagens instalada numa extrusora (Barwell Global LTD, Inglaterra).

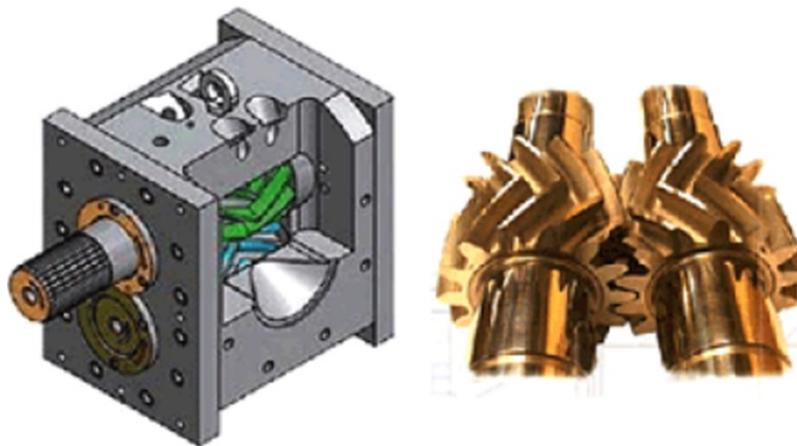


Figura 75B – Bomba de engrenagens em detalhe (Barwell Global LTD, Inglaterra).

5 PROJETO DE MATRIZES

A matriz é o componente mais importante na determinação da qualidade e da correta consistência dimensional do produto.

Qualidade e Produtividade

- Matéria-prima
- Processamento
- Equipamentos
- Ferramentas

Qualidade em Extrudados

- Seção transversal constante (dimensões)
- Acabamento superficial

O projeto da matriz é um aspecto da engenharia de extrusão que tem permanecido mais como uma arte do que qualquer outro aspecto. A razão óbvia é que é muito difícil determinar a geometria ótima do canal de escoamento (fluxo) a partir de cálculos de engenharia.

A descrição do escoamento do polímero fundido através da matriz requer o conhecimento do comportamento viscoelástico do polímero fundido. O polímero fundido não pode ser considerado um fluido puramente viscoso porque os efeitos elásticos na região da matriz são muito importantes.

Infelizmente não existe uma equação simples que descreva adequadamente o comportamento de fluxo do polímero fundido por uma larga faixa de condições de fluxo. Portanto, por um lado, uma análise simples do escoamento através da matriz é geralmente aproximada enquanto que, por outro lado, uma análise mais precisa do escoamento ao longo da matriz tende a ser muito complicada. Muitas análises mais precisas do escoamento na matriz utilizam o método de elementos finitos (FEM).

5.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

O objetivo de uma matriz para extrusão é distribuir o polímero fundido no canal de fluxo de maneira que o material saia da matriz com velocidade uniforme.

A distribuição real será determinada pelas propriedades de fluxo do polímero, pela geometria de escoamento do canal, pela taxa de escoamento através da matriz e pelo campo de temperaturas na matriz.

Se a geometria do canal de escoamento é otimizada para um polímero, sob um determinado conjunto de condições, uma mudança simples na taxa de fluxo ou da temperatura pode fazer com que a geometria deixe de ser ótima. Exceto para matrizes circulares, é impossível obter uma geometria de canal de escoamento que possa ser utilizada para uma grande quantidade de polímeros e para uma larga faixa de condições de operação.

Por esta razão, normalmente, o projetista incorpora partes ajustáveis à matriz de modo que a distribuição do polímero possa ser alterada externamente durante a operação da extrusora. A distribuição do escoamento do polímero é alterada, geralmente, de duas maneiras:

(a) alterando a geometria do canal de escoamento por meio de partes móveis regulares (*“choker bars, restrictor bars”*), válvulas, etc. e

(b) alterando a temperatura local da matriz. Tais capacidades de ajuste complicam o projeto mecânico da matriz, mas melhoram sua flexibilidade e controlabilidade.

A seguir são apresentadas algumas regras gerais que são úteis no projeto de matrizes:

- ausência de pontos mortos no canal de fluxo;
- aumento gradual da velocidade ao longo do canal de fluxo;
- tanto a montagem como a desmontagem da matriz deve ser fácil;
- o comprimento do orifício deve ser 10 vezes maior que a abertura (altura) do orifício da matriz ("*land length* \approx $10 \times$ *land clearance*");
- evitar mudanças bruscas da geometria do canal de fluxo;
- usar pequenos ângulos de aproximação.

Por outro lado, no projeto de matrizes, podem ocorrer problemas devido ao desconhecimento, por parte do desenhista do produto, das implicações que o desenho do produto pode ter com relação às dificuldades relacionadas à extrusão do produto.

Em muitos casos, pequenas alterações no desenho (do produto) podem melhorar significativamente a extrudabilidade do produto. Algumas orientações básicas para minimizar problemas de extrusão de perfis são:

- usar generosos raios internos e externos em todos os cantos (o menor raio possível é 0,5 mm);
- manter espessuras uniformes das paredes (importante!);
- evitar paredes muito grossas;
- fazer as paredes interiores mais finas que as exteriores para facilitar o resfriamento;
- minimizar o uso de seções ocas ("*hollow sections*").

A Figura 76 ilustra algumas poucas aplicações destas regras básicas.

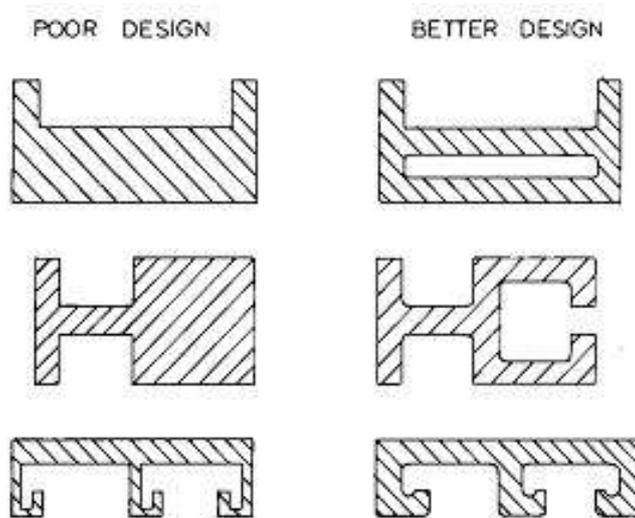


Figura 76. Elementos de projeto de matriz.

5.2 CONCEITOS ELEMENTARES DO PROJETO DE MATRIZES

Métodos para projeto de matrizes, para avaliar as dimensões ótimas de cada zona constituinte, são inevitavelmente de natureza iterativa e estes procedimentos são normalmente iniciados considerando como constantes:

- (a) o diâmetro requerido para o produto (relacionado mas não igual às dimensões do orifício de saída da matriz) e
- (b) as taxas de processamento desejadas.

Na Figura 77 é apresentado um diagrama simplificado de uma matriz para extrusão de plásticos para um perfil de seção circular.

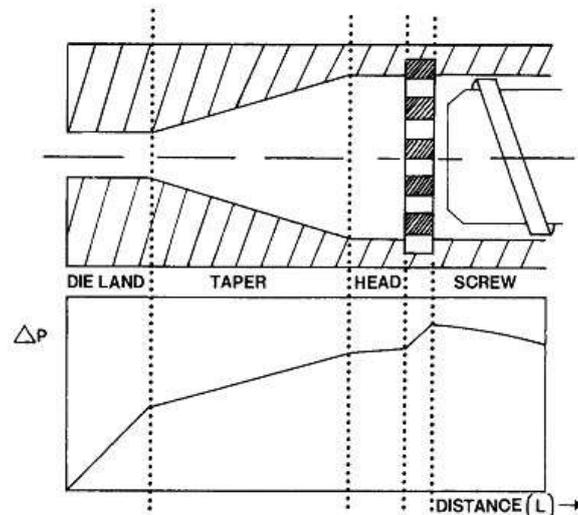


Figura 77. Perfil da pressão para uma matriz simplificada.

Os requisitos para o comprimento do orifício ("die land") e da seção cônica("taper"), e outras dimensões de seções interiores, são avaliadas utilizando curvas de fluxo de plásticos para determinar a magnitude da queda de pressão para escoamento estacionário ao longo de cada sub-seção da matriz. A queda de pressão total é calculada somando-se as perdas de pressão individuais. Estas incluem:

- (1) escoamento em seções paralelas (placa perfurada, seção anterior à seção cônica("head") e orifício ("die land")) com perdas de pressão devido a escoamento por cisalhamento;
- (2) fluxo em seções cônicas convergentes onde a queda de pressão total é aproximada pela soma algébrica das contribuições individuais de escoamento por cisalhamento e elongacional e a magnitude e a importância das perdas de pressão devido ao fluxo elongacional estão relacionadas com o grau de conicidade;
- (3) perdas de pressão em entradas devido a severas mudanças no tamanho da seção transversal.

Como as perdas de pressão variam diretamente com o comprimento, uma reação imediata é minimizar o comprimento da seção da matriz aumentando, em alguns casos, a severidade dos ângulos de conicidade.

Devido a algumas propriedades especiais dos polímeros fundidos, esta medida tem algumas limitações.

- A elasticidade do polímero fundido requer que o comprimento do orifício da matriz ("die land sections") seja grande o suficiente para apagar efeitos da memória elástica que poderiam causar distorção ou instabilidade dimensional do extrudado.

- Argumentos similares podem ser aplicados a situações onde o fundido é dividido e reformado, como ocorre na extrusão de filmes tubulares ou tubos, onde a corrente do fundido é soldada após fluir através das pernas de aranha que servem de suporte do mandril da matriz. Linhas de solda podem ser apagadas pelo uso de elevadas taxas de cisalhamento e maior tempo de residência, ou seja, aumentando o grau de restrição ao fluxo como, por exemplo, aumentando o comprimento do orifício ("land length").

- Para evitar a possibilidade de ocorrer fratura do fundido que, segundo alguns autores, ocorre devido a excessiva tensão elongacional na seção cônica, o ângulo de conicidade deve ser controlado. A taxa de cisalhamento, na qual a fratura do fundido ocorre, aumenta com o aumento do comprimento do capilar e diminui com o aumento do ângulo de entrada. Se as tensões elongacionais, na entrada da matriz, excedem a resistência ao estiramento do fundido então a fratura ocorrerá. Além disso, a taxa de cisalhamento crítico na

qual este fenômeno ocorre diminui com o aumento da viscosidade do polímero fundido e, portanto, com o aumento do seu peso molecular.

- Sempre que largas distribuições de tempo de residência são evidentes, ou em casos extremos em que significativos ângulos de entrada existem (resultando na promoção de fluxos de circulação na entrada da zona cônica), severa degradação do fundido pode ocorrer se o polímero não foi estabilizado adequadamente.

5.3 DIMENSÕES DO EXTRUDADO NA SAÍDA DA MATRIZ

A diferença entre as dimensões da saída da matriz e as dimensões do produto é consequência inevitável das propriedades elásticas dos polímeros.

Esta disparidade é exagerada pela dependência do **inchamento** com relação a uma faixa grande de variáveis relacionadas com o **tipo de material** e com as **condições de processamento**. Além disso, este problema é influenciado pela contínua necessidade de aumentar as taxas de produção para um determinado produto.

Existem dois outros fatores que, somados ao inchamento, contribuem com as dimensões finais do produto e que devem ser considerados com o objetivo de relacionar as dimensões do extrudado com as dimensões da matriz: efeitos de estiramento e efeitos térmicos.

5.4 ELASTICIDADE DO FUNDIDO – INCHAMENTO DO EXTRUDADO

Embora o inchamento do extrudado seja um fenômeno dependente do tempo, a maior proporção do inchamento ocorre antes que o resfriamento possa suprimir a relaxação responsável por ele.

Conceitos sobre inchamento do extrudado já foram vistos anteriormente. Para resumir estes conceitos, no contexto de extrusão prática, pode-se dizer que o inchamento normalmente aumenta se:

(1) A velocidade de produção aumenta ou as dimensões laterais diminuem, ou seja, a taxa de cisalhamento aumenta. Este efeito ocorre até o ponto em que começa a ocorrer fratura do fundido ou instabilidade.

(2) A temperatura do fundido aumenta.

(3) O peso molecular médio aumenta⁵.

(4) A relação L/D é diminuída. Isto é válido para uma extensão do capilar no qual fluxo estacionário ainda não foi obtido (para baixos valores de L); se os tempos de relaxação são muito superiores ao tempo de residência no capilar a extensão do inchamento pode ser excepcionalmente elevada. Os efeitos elásticos tornam-se muito importantes quando o tempo de residência é significativamente menor do que o tempo de relaxação (ou tempo natural). Em termos reais, isto significa que as moléculas estão ainda na configuração totalmente tensionada na saída da matriz. Como grande parte da deformação de cisalhamento é recuperável, este mecanismo ajuda a explicar porque a razão de inchamento do extrudado aumenta significativamente (para pequenos capilares) com a diminuição da razão L/D .

Para formas não-simétricas, ou mais complexas, a função do projetista da matriz torna-se mais difícil porque o inchamento ocorrerá em diferente extensão em diferentes regiões da periferia do extrudado.

⁵ Aumento em distribuição de peso molecular e do grau de ramificação das cadeias também parecem aumentar o inchamento do extrudado; estes efeitos, entretanto, não têm sido confirmados para grupos completos de plásticos.

Se a geometria da saída do canal de fluxo da matriz é igual à geometria do produto, o inchamento desigual causará uma distorção do extrudado e a geometria requerida para o produto não poderá ser obtida. O estiramento ("*draw down*") não poderá resolver este problema. Portanto, a geometria na saída do canal de fluxo deverá ser, geralmente, diferente da geometria requerida para o produto. Isto pode ser entendido pela análise dos perfis de velocidade nos canais de fluxo. A Figura 78 mostra os perfis de velocidade em um canal de fluxo com seção transversal quadrada.

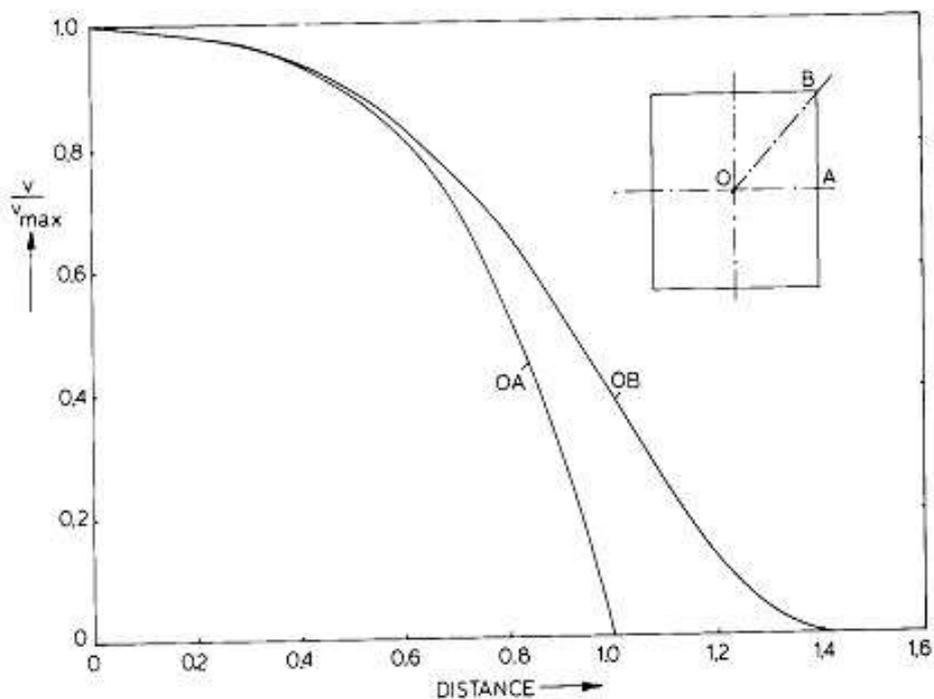


Figura 78. Perfil de velocidade em uma matriz quadrada.

Pode ser visto que as taxas de cisalhamento na parede variam significativamente. A taxa de cisalhamento no canto (curva OB) é relativamente baixa, enquanto que a maior taxa de cisalhamento ocorre no meio da parede. Portanto, a recuperação elástica no meio será maior do que a recuperação elástica nos cantos.

O resultado é um extrudado deformado em sua geometria e não apenas em suas dimensões. Não é possível obter um extrudado com seção transversal perfeitamente quadrada a partir de um canal de fluxo perfeitamente quadrado.

Para eliminar este problema deve-se modificar a forma do canal de fluxo para compensar o inchamento desigual do extrudado. Um bom projetista de matrizes deve antecipar (prever) a quantidade de inchamento desigual e projetar o canal de fluxo de forma a eliminar o problema.

Esta tarefa é muito difícil e a geometria do canal de fluxo é frequentemente determinada por um processo de "tentativa e erro". Previsões matemáticas precisas do perfil de inchamento do extrudado são difíceis de se obter e, portanto, a determinação da geometria apropriada do canal de fluxo para minimizar o inchamento desigual, através de cálculos de engenharia, geralmente não é praticável.

O inchamento não uniforme do extrudado e a correção da geometria do canal de fluxo são ilustrados na Figura 79.

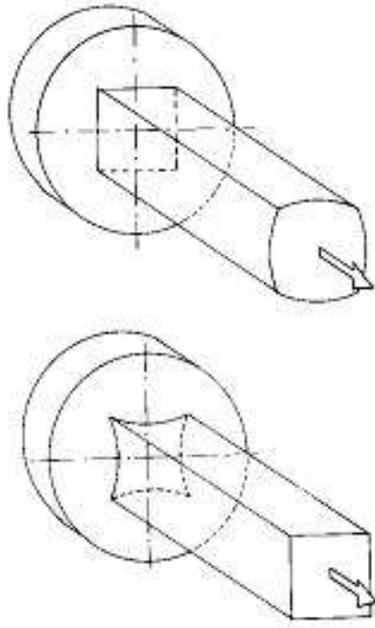


Figura 79. Inchamento desigual do extrudado e possíveis correções.

A quantidade de inchamento é muito dependente da natureza do material. Alguns polímeros exibem considerável inchamento (**100 a 300%**) como, por exemplo, **polietilenos**.

Outros exibem inchamento muito **pequeno** como, por exemplo, **poli(cloreto de vinila)**. Quando o PVC é extrudado a temperaturas relativamente baixas (165 a 175°C), o inchamento varia entre **10 e 20%** somente.

Esta é uma das razões porque o PVC é tão popular em extrusão de perfis; ele assume muito bem a geometria do canal de fluxo e possui boa resistência no estado fundido.

É óbvio que estes efeitos levam a sérias limitações na etapa do projeto, porque a escolha correta da forma da matriz e de suas dimensões (para gerar a seção desejada para o produto após o inchamento do extrudado) depende não apenas do tipo de polímero processado, mas também da velocidade de processamento e dos parâmetros de programação da máquina.

5.5 VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO – EFEITOS DE ESTIRAMENTO

O estiramento é definido de forma simplificada como uma deformação longitudinal imposta a um fundido extrudado, parcialmente solidificado, devido à tensão criada pela maior velocidade de estiramento (puxamento) em relação à velocidade de extrusão através da matriz.

A origem do estiramento é mostrada simplificada na Figura 80.

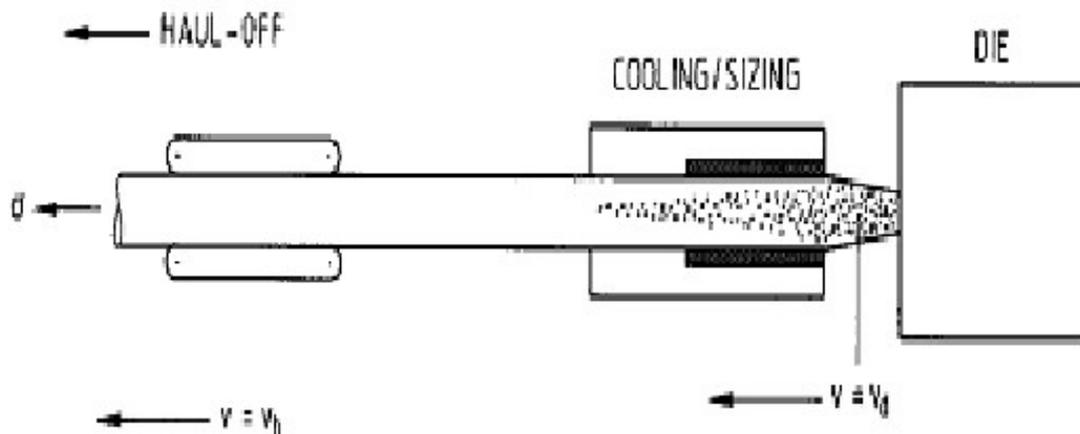


Figura 80. Origem do estiramento induzido na extrusão de polímeros, $V_h > V_d$.

Sempre que ocorre o estiramento, é a parte fundida que se deforma, preferencialmente, sob uma tensão de estiramento longitudinal.

Embora, neste caso, as mudanças de dimensão se oponham às mudanças de dimensão devidas ao inchamento do extrudado, não é aconselhável tentar balancear estes efeitos na prática, pois as unidades de resfriamento e calibração necessitariam ser projetadas corretamente para isso e, também, estiramento excessivo resulta em características superficiais pobres e introdução de orientação molecular na direção da máquina de um produto extrudado. Por outro lado, o uso do estiramento é importante na produção de filmes e fibras altamente orientados.

5.6 ESTABILIZAÇÃO DA FORMA – EFEITOS TÉRMICOS

Sobreposta aos fenômenos de inchamento do extrudado e de estiramento, está a contração térmica que acompanha o resfriamento do extrudado.

Diferenças de volume específico, entre temperatura do fundido e temperatura ambiente, determinam a extensão da contração térmica que, geralmente, será maior em termoplásticos de elevada cristalinidade.

Resfriamento não homogêneo de seções espessas pode levar à ocorrência de tensões residuais, que poderão causar empenamento do extrudado, ou à formação de vazios internos.

5.7 INSTABILIDADES NO ESCOAMENTO ATRAVÉS DA MATRIZ: FRATURA DO FUNDIDO, FRATURA SUPERFICIAL E RESSONÂNCIA DO ESTIRAMENTO

Há basicamente cinco tipos de fratura do fundido: pele de cação (*sharkskin*), ondulações (*ripple*), bambu (*bamboo*), ondulado (*wavy*) e distorção severa (*severe distortion*).

A fratura do fundido para o PEBDL (Figura 81) apresenta o tipo pele de cação (b), bambu (c) e distorção severa (d).

A fratura superficial (pele de tubarão ou de cação) apresenta-se na forma de uma ausência de brilho ou na existência de rugas na direção perpendicular à direção de extrusão. Fatores tais como taxa de cisalhamento, dimensões da matriz, ângulo de entrada, rugosidade superficial, relação L/D e material de construção da matriz, parecem influenciar pouco ou nada a ocorrência de fratura superficial. Foi observado que a elevação da temperatura da matriz elimina a ocorrência deste defeito.

Os outros tipos de fratura, por outro lado, podem ser reduzidas processando o polímero a velocidades mais baixas, reduzindo seu peso molecular ou sua viscosidade, aumentando a área da seção transversal na saída do canal de fluxo da matriz, usando um lubrificante, ou um plastificante, diminuindo o ângulo de entrada na matriz ou aumentando sua relação L/D. A elevação da temperatura para resolver o problema de fratura do fundido mais severas é criticada por alguns autores.

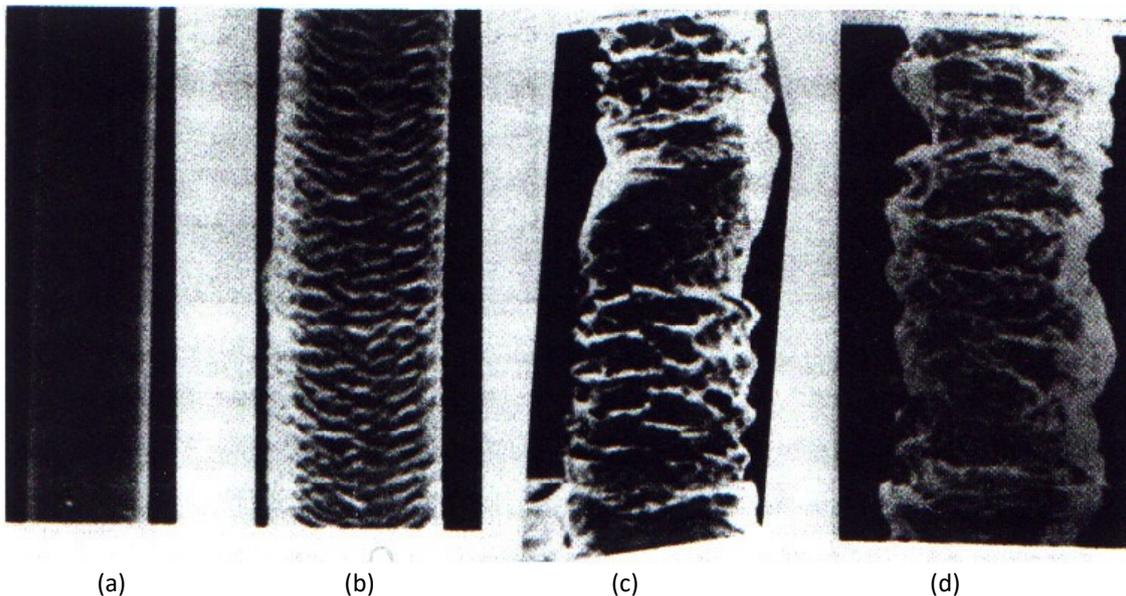


Figura 81. Tipos de fratura do fundido para o PEBDL (a) sem fratura, (b) pele de cação, (c) bambu e (d) distorção severa.

A fratura do fundido para o PEAD (Figura 61) apresenta o tipo pele de cação (a), bambu (b) e ondulação (c).

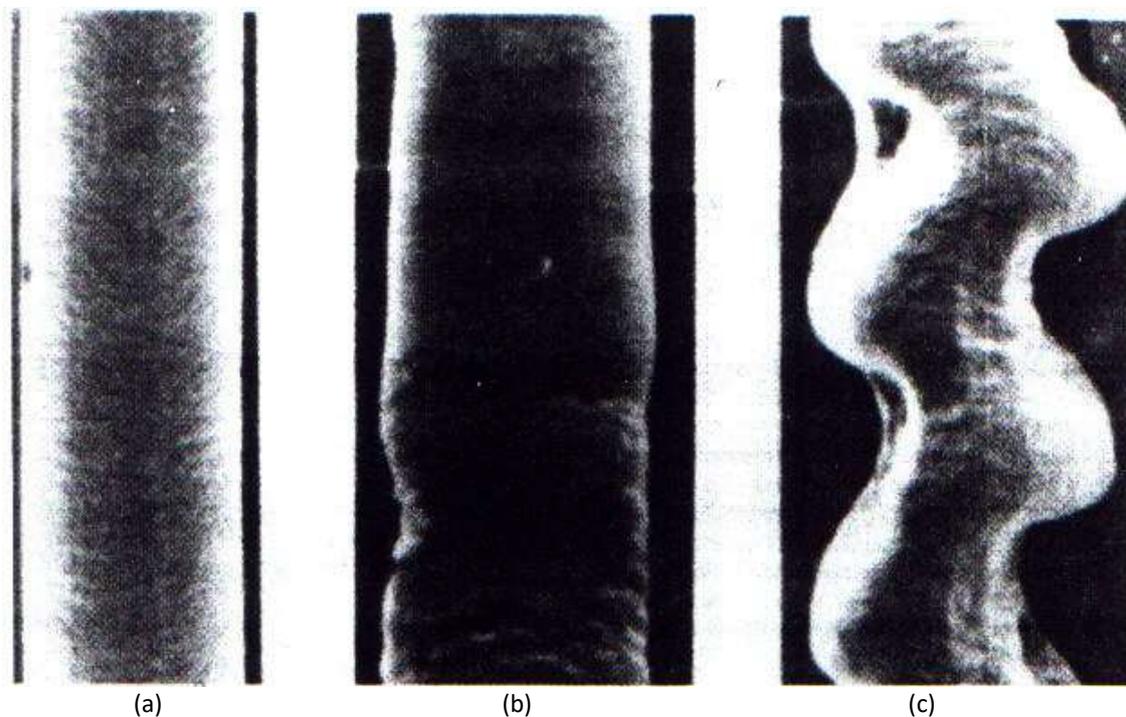


Figura 82. Tipos de fratura do fundido para o PEAD (a) pele de cação, (b) bambu e (c) distorção severa.

A fratura do fundido para o PEBD (Figura 83) apresenta o tipo ondulado (b) e distorção severa (c).

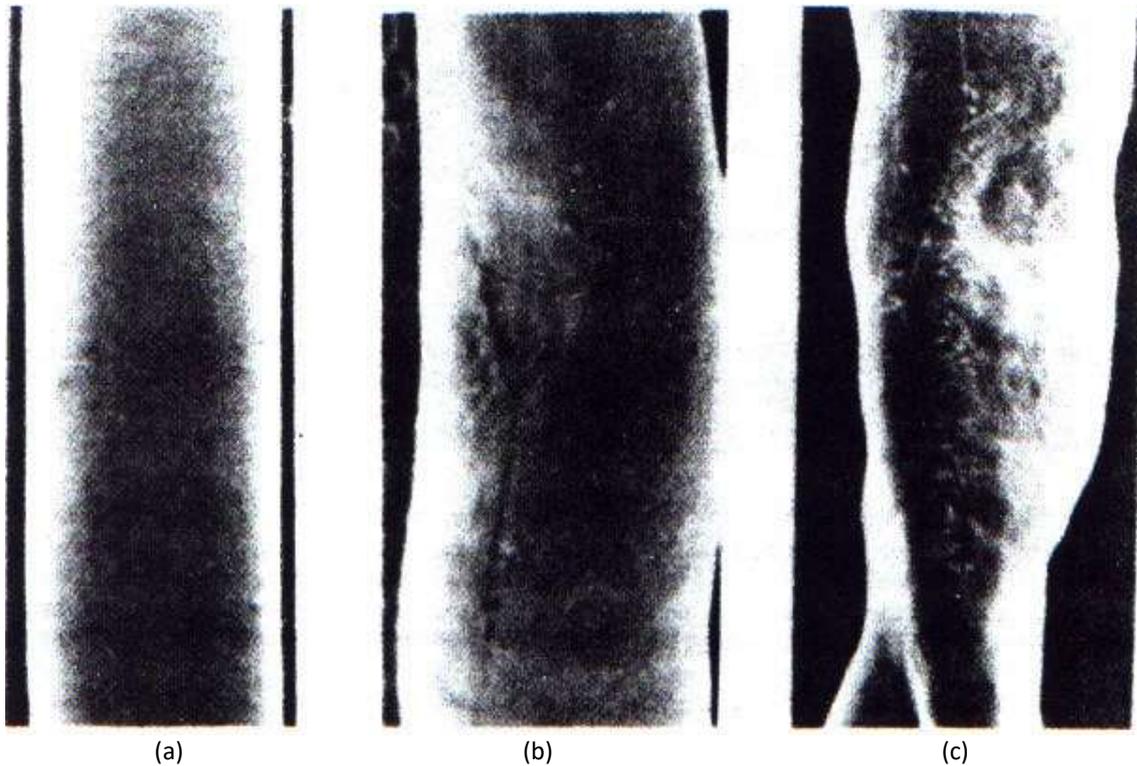


Figura 83. Tipos de fratura do fundido para o PEBD (a) sem fratura, (b) ondulado e (c) distorção severa.

A ressonância do estiramento (*draw resonance*) ocorre em processos em que o extrudado é exposto a um fluxo de estiramento alongacional, com superfície livre, tal como extrusão de filme tubular, fiação e moldagem por sopro. Ele se manifesta como uma variação cíclica regular das dimensões do extrudado. A ressonância do estiramento ocorre acima de uma determinada razão de estiramento crítica enquanto o polímero ainda está no estado fundido.

Fluidos com comportamento próximo ao Newtoniano como nylon, poliéster e polisiloxano, apresentam razão de estiramento crítica de aproximadamente 20. A razão de estiramento crítica para fluidos fortemente não-Newtonianos, como PE, PP e PS, pode ser tão baixa como 3.

5.8 EFEITOS DA RESTRIÇÃO, TEMPERATURA DO FUNDIDO E PROJETO DE ROSCA NO FLUXO PELA MATRIZ

Já verificamos que o transporte de polímero em direção à matriz é devido às forças de atrito entre o plástico e o cilindro.

Também foi visto que as forças de atrito entre o plástico e a rosca se opõem ao transporte na direção da matriz. Sem uma força de atrito contra o cilindro, não existe transporte, mas, apenas rotação do material junto com a rosca.

Por outro lado, o transporte através da matriz ocorre devido à pressão desenvolvida pela rosca, ou seja, o fluxo através da matriz ocorre devido à diferença de pressão entre a entrada e a saída da matriz.

Como a pressão na saída é sempre a pressão atmosférica, a produção da extrusora é determinada diretamente pela pressão na entrada da matriz ("*die-head pressure*").

Desta maneira, a rosca é o elemento gerador de pressão, enquanto a matriz é o elemento que consome pressão. A pressão, que contribui para reduzir a eficiência da capacidade de bombeamento da

rosca atua, por outro lado, como a força propulsora que conduz o fundido através da matriz. A produção da extrusora, portanto, é determinada pela interação entre a extrusora e a matriz (Figura 84).

Um dos principais objetivos na operação de uma linha de extrusão é projetar o processo para funcionar em condições de produção elevada e pressão baixa. Entretanto, quando o número de fatores que determina a localização do ponto de operação é considerado, torna-se claro que é necessária uma grande habilidade na otimização do projeto de um equipamento e da dinâmica do processo nesta base.

É importante considerar que as equações características para fluidos pseudoplásticos, ao contrário do que ocorre para os Newtonianos, não são retas, mas sim, curvas.

A produção da extrusora diminui na medida em que a pressão, no final da rosca, aumenta, enquanto a produção da matriz aumenta a medida que a pressão na entrada da matriz aumenta. Isto é mostrado na Figura 84.

Desta maneira, cada extrusora e cada matriz têm suas próprias curvas características. Estas são determinadas pela geometria da máquina, pelas condições de operação, tais como temperatura e velocidade da rosca, e as propriedades de fluxo do plástico. A produção e a pressão reais, na entrada da matriz, resultantes de uma combinação extrusora/matriz, são determinadas pela interseção de duas curvas características: da extrusora e da matriz (Figura 84).

Foi visto que a curva característica da matriz é determinada pela geometria do canal de escoamento da matriz e pela viscosidade do polímero fundido. Em uma matriz com passagens de fluxo muito finas, que restringem o fluxo, o fundido necessitará pressão muito elevada para que se obtenha razoáveis taxas de fluxo.

Uma matriz com passagens de fluxo amplas irá requerer apenas baixas pressões para que se obtenham taxas de fluxo satisfatórias (Figura 84).

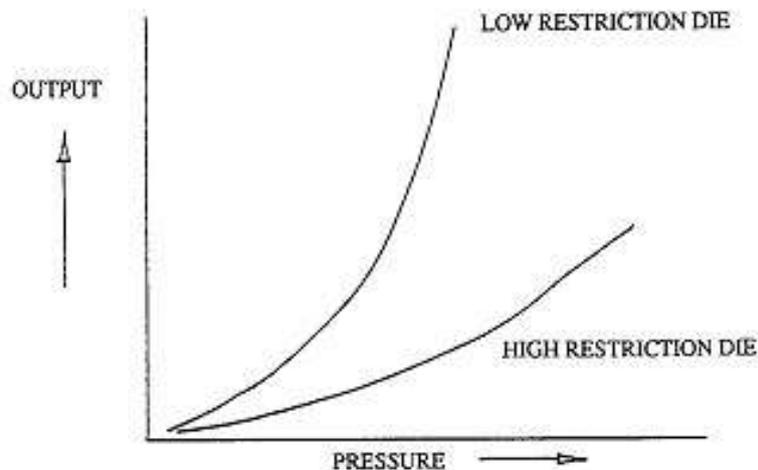


Figura 84. Curvas características da matriz com baixa e elevada restrição.

A temperatura também afeta a curva característica da matriz. Uma temperatura elevada na matriz reduz a restrição ao fluxo e resulta uma pressão mais baixa na entrada da matriz, para a mesma produção, ou uma maior produção com a mesma pressão na entrada da matriz. Isto é mostrado na Figura 85. A menor restrição ao fluxo na matriz, devido à maior temperatura, é devido ao fato de que a viscosidade do fundido diminui com o aumento da temperatura.

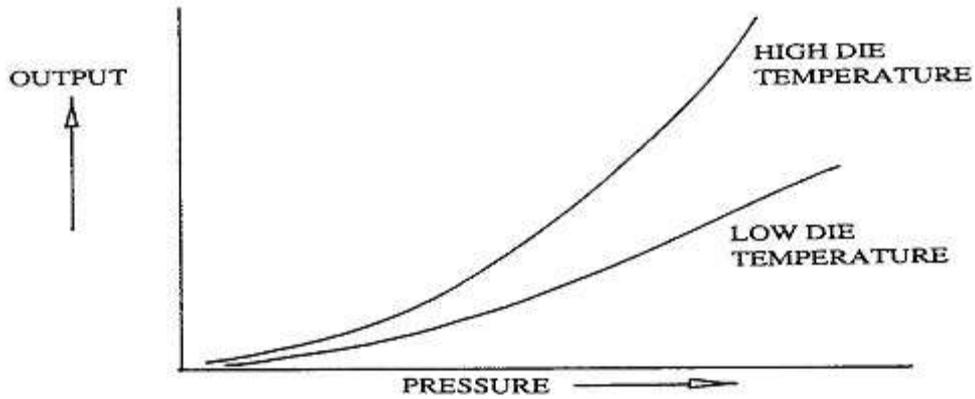


Figura 85. Curva característica da matriz para baixa e alta temperatura do fundido.

Foi visto, também, que a curva característica da extrusora é determinada pela geometria da rosca, pela velocidade da rosca, pelas temperaturas do cilindro e pelas propriedades de escoamento do plástico fundido.

Uma rosca com canais profundos dará uma produção elevada com pressões baixas na entrada da matriz, mas a produção cairá significativamente com o aumento da pressão. Uma rosca com canais rasos dará baixas produções com baixas pressões na entrada da matriz, mas a produção não cairá rapidamente com o aumento da pressão (Figura 86).

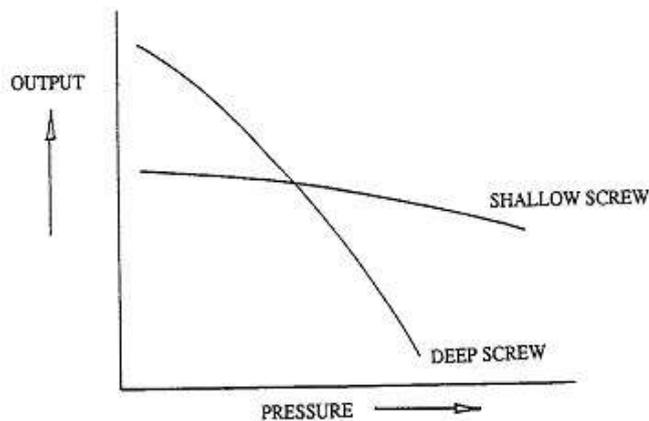


Figura 86. Curva característica de rosca com canais raso e profundo.

Portanto, **uma matriz com elevada restrição ao fluxo deveria ser combinada com uma rosca rasa**, enquanto **uma matriz com baixa restrição deveria ser combinada com uma rosca profunda** (Figura 87).

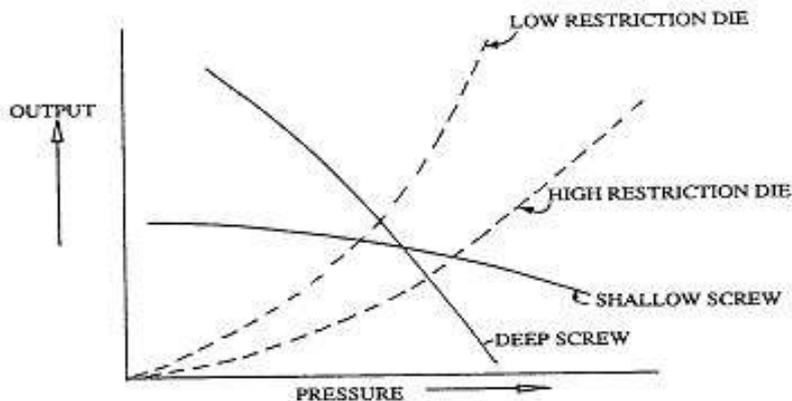


Figura 87. Curvas características.

5.9 TIPOS DE MATRIZES

A seguir serão apresentados os tipos de matrizes que existem e que estão relacionados com o tipo de produto que se deseja obter.

5.9.1 MATRIZES PARA CHAPAS E FILMES PLANOS

Matrizes para filmes planos e chapas são iguais. A única diferença é que a abertura das matrizes para filmes apresenta espessura inferior a 0,5 mm.

A Figura 88 mostra três geometrias de canais de distribuição usadas em matrizes para chapas. Destas três, a matriz em “T” apresenta a pior distribuição de polímero fundido.

A matriz tipo “rabo de peixe” apresenta melhor distribuição do que a tipo “T”, mas ainda apresenta problemas de uniformidade com aumento da complexidade quanto à usinabilidade.

A matriz tipo cabide é a geometria mais comumente utilizada na extrusão de chapas.

A geometria da seção da matriz tipo cabide pode ser desenhada de modo oferecer uma distribuição muito uniforme do polímero fundido. Por ser a mais difícil de usinar, ela é a mais cara das três.

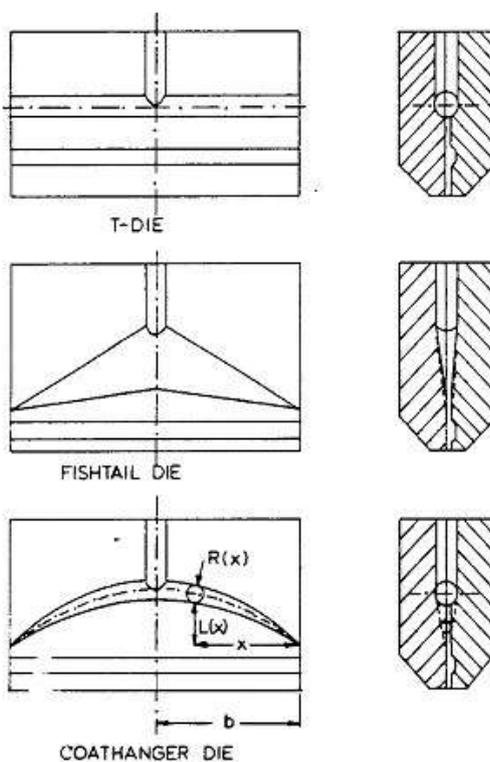


Figura 88. Esquemas de matrizes tipo “T”, tipo “rabo de peixe” e tipo “cabide”.

A Figura 89 mostra duas técnicas usadas comumente para mudar a geometria do canal de fluxo em matrizes para chapas.

A primeira é o ajuste flexível dos lábios (“*flexlip*”). Esta técnica consiste em parafusos, situados ao longo da largura da matriz, que permitem ajustes locais na extremidade da fenda da matriz. Isto possibilita ajustes finos da espessura do extrudado em alguns pontos. O ajuste da fenda poderá atingir 1 mm ou mais.

Outra técnica de ajuste mostrada nesta Figura 89 é a “barra de obstrução” (“*choker bar*”). O ajuste da “*choker bar*” é similar ao ajuste da “*flexlip*”. A “*choker bar*” pode ser deformada em alguns pontos ao longo

da largura da matriz através de parafusos de ajuste. A deformação da “*choker bar*” causa uma mudança na altura do canal de fluxo e, desta maneira, permite um ajuste da distribuição do fluxo na matriz.

Uma terceira possibilidade de ajuste, não mostrada na Figura 89, é a temperatura da matriz. O aquecimento ou resfriamento de certas seções da matriz facilita ou restringe o fluxo permitindo o ajuste da distribuição do fluxo. O ajuste da temperatura será mais efetivo com polímeros cuja viscosidade seja mais sensível à temperatura: isto inclui a maioria dos polímeros amorfos.

A Figura 89 também mostra um aspecto da matriz de chapas que é útil quando uma grande faixa de espessuras é necessária. Pela incorporação de um lábio inferior removível, a matriz pode ser usada, por exemplo, para chapas de extrusão de 1 mm a 4 mm simplesmente pela troca do lábio inferior da matriz. Sem isso, uma outra matriz deveria ser usada porque o “*flexlip*” pode ser usado somente por uma faixa limitada de espessura. Em algumas linhas de extrusão automatizadas, a fenda da matriz pode ser ajustada automaticamente.

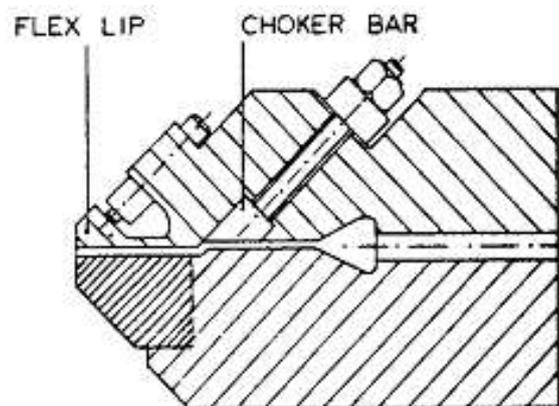


Figura 89. Esquema de matrizes plana com diferentes ajustes.

5.9.2 MATRIZES PARA MANGUEIRAS E TUBOS

A diferença entre mangueiras e tubos é determinada principalmente pelo valor do diâmetro.

Produtos com diâmetros inferiores a 10 mm são, geralmente, referidos como mangueiras. Mangueiras são geralmente extrudadas com matrizes tipo “*crosshead*” (de alimentação lateral ou em ângulo de 90°). Veja a Figura 90.

A direção de entrada do fluxo é perpendicular à direção de saída do fluxo. O polímero fundido faz uma curva de 90°, envolvendo o tubo que sustenta o mandril, e reencontrando-se na parte posterior do tubo onde, então será formada uma linha de solda. Após esta curva de 90° o polímero fundido flui através do canal de fluxo anular onde ele adota mais ou menos a forma da região final da matriz (“*land*”).

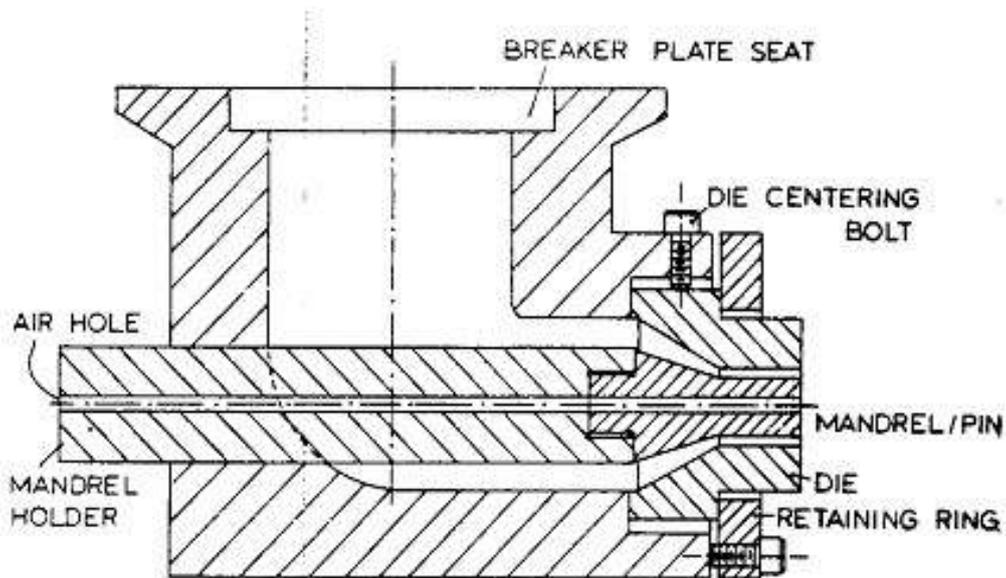


Figura 90. Esquemas de matrizes para tubos e mangueiras do tipo *crosshead*.

Linhas de solda, usualmente, são inevitáveis em produtos ocios extrudados. O processo de reconstituição da união (e homogeneização) na linha de solda é essencialmente um processo de re-entrelaçamento das moléculas do polímero.

São parâmetros importantes deste processo: **tempo, pressão e temperatura.**

O tempo de "cura" diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o aumento do peso molecular. Em termos práticos, isto significa que o ponto em que se forma a linha de solda deve ocorrer a uma distância razoavelmente grande em relação à saída da matriz.

A matriz tipo "*crosshead*" é também usada em revestimento de fios (Figura 90). Neste processo, o condutor passa através do centro oco do mandril e torna-se revestido com o polímero fundido próximo à saída da matriz. O condutor pode estar descoberto ou já revestido com uma ou mais camadas de polímero.

No revestimento de fios existem dois processos: (a) extrusão com alta pressão e (b) extrusão com baixa pressão.

Em extrusão com alta pressão (Figura 91-a), o polímero fundido encontra o condutor antes da saída da matriz. Isto permite um bom contato entre o condutor e o polímero. Na extrusão a baixa pressão (Figura 91-b), o polímero fundido encontra o condutor após a saída da matriz. Este processo a baixa pressão é usado quando bom contato entre o condutor e o polímero não é essencial.

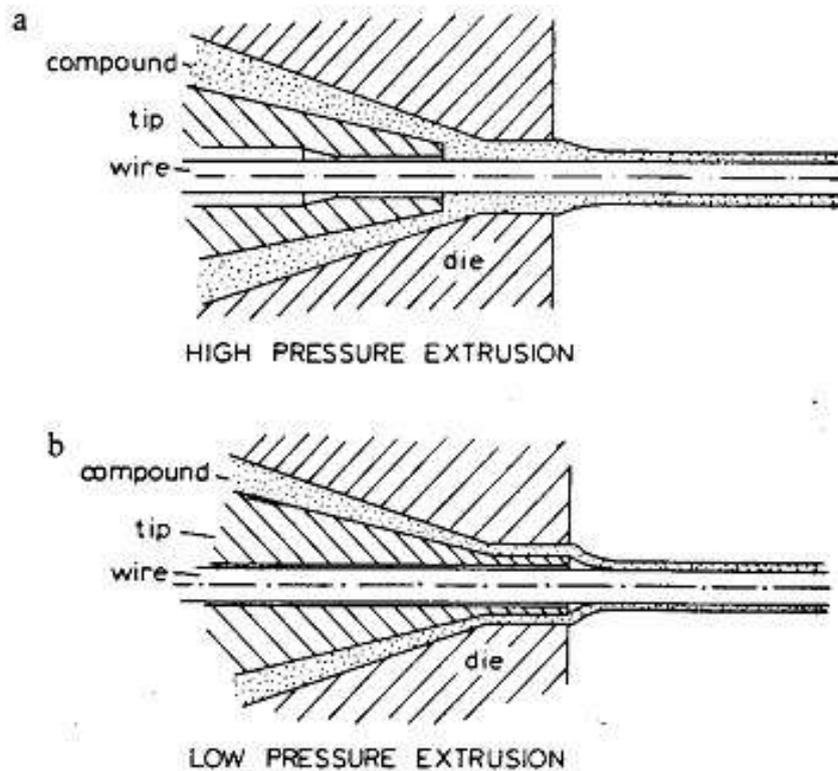


Figura 91. Esquemas de matrizes para capeamento de fios. (a) alta pressão. (b) baixa pressão.

Na maioria das matrizes tipo “*crosshead*” (em ângulo de 90°), a localização da parte externa da matriz, em relação à parte interna é ajustada com parafusos de centralização (Figura 90). Isto permite o ajuste da distribuição de espessura da parede e da concentricidade.

Em algumas linhas de extrusão com medição “*on-line*” da espessura do filme, um controle automático da espessura do filme é obtido pelo uso do sinal do sensor de medida de espessura para o ajuste automático da posição da matriz.

Em alguns casos, uma leve pressão interna de ar é aplicada através do centro da matriz com o objetivo de manter o diâmetro interno da mangueira ou para evitar o seu colapso. No revestimento de fios, algumas vezes é aplicado vácuo no centro do tubo para evitar que haja aprisionamento de ar entre o condutor e a camada de polímero.

Na produção de tubos são, em geral, empregadas matrizes “*in-line*” (Figura 92). Nestas matrizes, a linha central (da matriz) está alinhada com a linha central da extrusora.

O torpedo central é suportado por estruturas chamadas “pernas de aranha” (três ou mais). As “pernas de aranha” são relativamente finas e com geometria aerodinâmica para minimizar a interrupção do perfil de velocidades.

Obviamente, formam-se linhas de solda quando o polímero se reencontra após as “pernas de aranha”. Portanto, estas deverão estar suficientemente distantes da saída da matriz para permitir a “cura” da linha de solda. Esta matriz também possui parafusos de centralização.

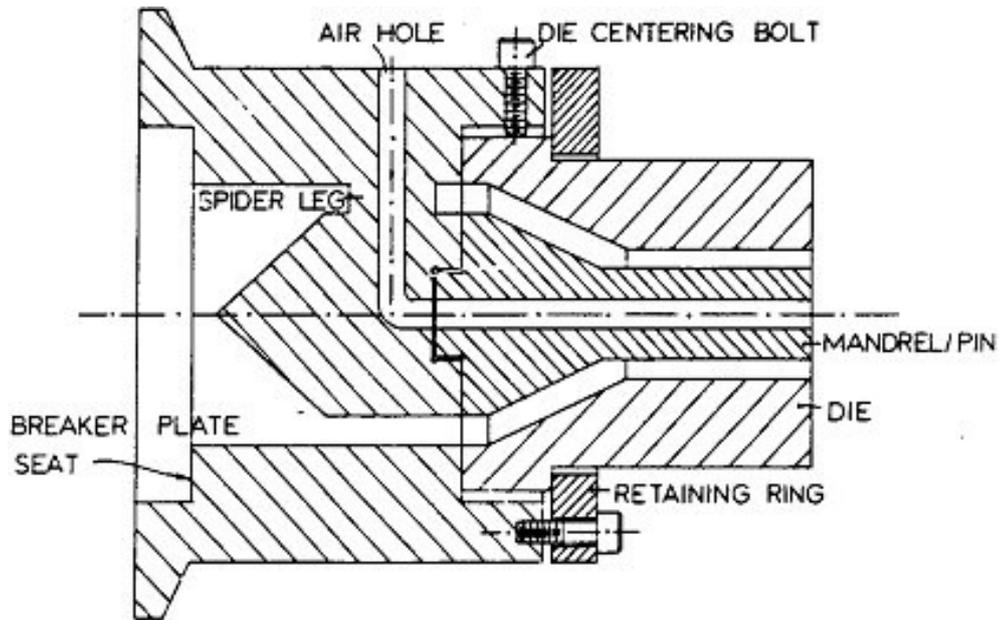


Figura 92. Esquemas do ajuste (centralização) da matriz tipo "in-line".

5.9.3 MATRIZES PARA FILMES TUBULARES

A matriz mais comum em extrusão de filmes pelo processo tubular é a matriz com mandril espiral. Nesta matriz, o polímero é dividido por vários canais que assumem a forma espiralada sendo que a profundidade destes canais é reduzida na direção do fluxo. A popularidade da matriz com mandril espiral é devida a esta requerer pressões relativamente baixas e a sua excelente distribuição do fundido. Matrizes com mandril espiral podem ser usadas com uma ampla faixa de condições de operação.

Uma representação simplificada de uma matriz com mandril em espiral é mostrada na Figura 93. A corrente de polímero fundido é dividida em diversas entradas de alimentação.

Cada entrada alimenta o polímero em uma ranhura espiral usinada no mandril. A área da seção transversal da ranhura diminui com a distância, enquanto a abertura entre o mandril e a parte externa da matriz aumenta na direção da saída. Esta multiplicidade de canais de escoamento resulta em espalhamento, ou numa divisão em camadas, do polímero fundido que sai das várias entradas de alimentação, resultando uma boa distribuição do polímero fundido que sai da matriz.

É óbvio que o ajuste local da fenda não é possível ao contrário do que ocorre com matrizes para chapas planas. Este último processo permite uma uniformidade do produto em torno de $\pm 5\%$, enquanto matrizes para filme tubular permitem uma uniformidade de espessura da parede em torno de $\pm 10\%$.

Por isso, a matriz para filme tubular deve girar para distribuir as variações de espessura ao longo do perímetro do filme. Se isto não for feito, a bobina do produto apresentará variações visíveis no diâmetro.

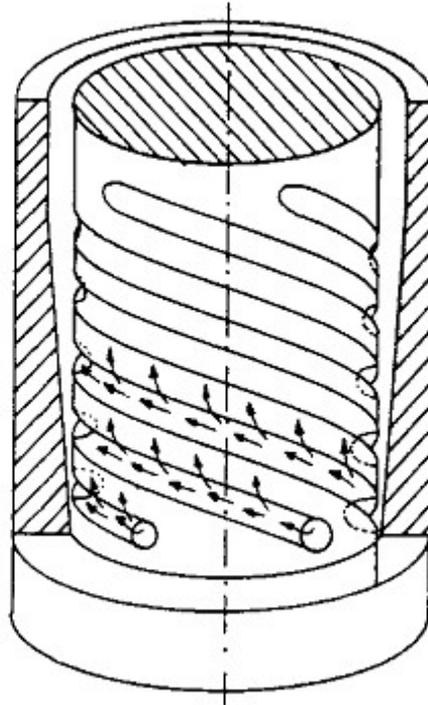


Figura 93. Matriz com mandril em espiral.

5.9.4 MATRIZES PARA EXTRUSÃO DE PERFIS

Fora os extrudados retangulares e anulares, existe uma enorme variedade de perfis com outras formas. As matrizes utilizadas para produzir formas diferentes da retangular ou anular são denominadas, usualmente, matrizes para perfis.

Extrusão de perfis é, geralmente, o tipo mais difícil de extrusão. Isto se deve ao fato de que é muito difícil prever com precisão a geometria requerida do canal de fluxo que permitirá a obtenção de um produto extrudado com dimensões e formas apropriadas.

Na extrusão de perfis, existem dois extremos em projeto de matrizes. Um deles é mostrado na Figura 94.

Neste projeto, uma placa com a abertura desejada é colocada abruptamente na extremidade do canal de fluxo da matriz com uma quantidade reduzida de desenho aerodinâmico. Este tipo de matriz é simples, fácil de fazer e fácil de modificar. Entretanto, existe uma grande região de fluxo morto e, portanto, a degradação é uma preocupação sempre presente com polímeros de limitada estabilidade térmica.

Este tipo de matriz, portanto, deve ser usada com polímeros relativamente estáveis.

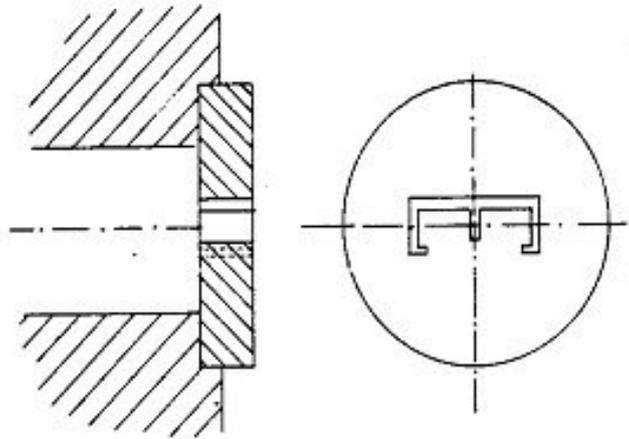


Figura 94. Matriz em forma de placa totalmente não aerodinâmica.

O outro extremo é o perfil de matriz altamente aerodinâmico mostrado na Figura 95. Nesta matriz, existe uma transição muito gradual desde a geometria do canal de entrada na matriz até a geometria do canal de saída da matriz.

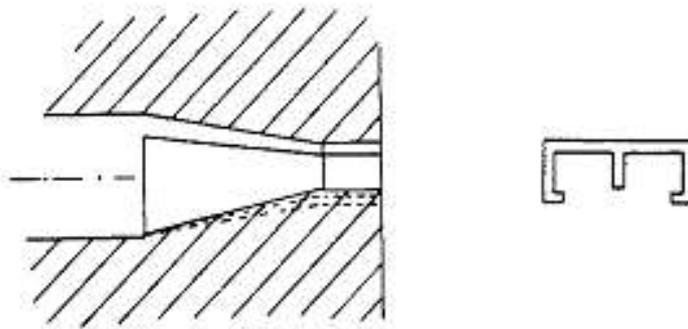


Figura 95. Matriz altamente aerodinâmica.

Obviamente, esta matriz é mais complexa, mais difícil de fabricar, e mais difícil de modificar. Boa aerodinâmica é importante se o polímero é suscetível à degradação. Uma matriz cujo perfil apresenta uma boa aerodinâmica é mais indicada quando a produção é elevada porque o custo unitário de fabricação pode ser menor e porque a degradação torna-se mais crítica em produções maiores.

Logicamente, existe um número infinito de projetos de matriz intermediários entre a placa matriz totalmente não aerodinâmica e a matriz de perfis totalmente aerodinâmica.

5.9.5 MATRIZES PARA CO-EXTRUSÃO

Co-extrusão é a extrusão simultânea de dois ou mais polímeros através de uma única matriz onde os polímeros são unidos de modo a formarem camadas distintas, bem unidas, formando um único produto extrudado. Co-extrusão tem sido aplicada em filmes, chapas, tubos, filmes soprados, revestimento de condutores e outros tipos de extrusão de perfis.

Vantagens da co-extrusão sobre o processo de co-laminação são melhores aderências entre as camadas, custos de materiais e de processamento reduzidos, propriedades melhores, reduzida tendência a ocorrência de “pinholes” (“buracos de agulha”), de-laminação e aprisionamento de ar entre as camadas.

Co-extrusão é aplicada em um variedade de aplicações em embalagens para obter boa resistência à umidade, propriedades de barreira a gás, custos reduzidos, e etc.

Uma combinação de **PE/nylon/PE** é muito popular na produção de embalagens esterilizáveis e descartáveis.

Outra combinação, a de **LDPE/HDPE** é usada para filmes “encolhíveis” e sacolas de compras para a obtenção de um balanço entre rigidez e baixo custo.

Co-extrusão de **PS/PSE expandido** é usada na produção de embalagem para ovos e bandejas para carne.

Na extrusão de chapas, a combinação **ABS/PS** é usada para revestimento de porta de refrigeradores. O ABS confere resistência química e o PS possibilita redução de custos.

Essencialmente, o número de aplicações é elevado e certamente o número de produtos co-extrudados continuará a aumentar.

Existem, basicamente, três técnicas diferentes de co-extrusão. A primeira emprega matrizes com blocos de alimentação onde as várias correntes de fundido são combinadas em uma seção transversal relativamente pequena antes de entrar na matriz. A vantagem deste sistema é simplicidade e baixo custo. Matrizes existentes podem ser utilizadas com pouca ou nenhuma modificação. Como desvantagens têm-se o fato de que as **propriedades de escoamento** dos diferentes polímeros devem ser próximas para evitar distorções interfaciais. Não existe controle individual de espessura das diversas camadas, somente um controle de espessura global. A Figura 96 mostra esquematicamente uma matriz para chapas com bloco de alimentação.

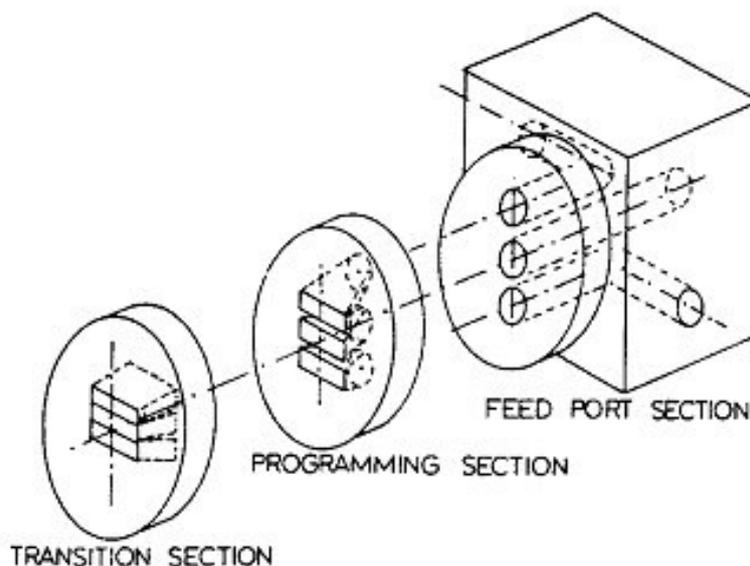


Figura 96. Esquema de uma matriz de chapas multicamadas com bloco de alimentação.

A segunda técnica de co-extrusão usa matrizes com combinação interna “*multimanifold*”. As diferentes correntes de fundido entram na matriz separadamente e se juntam dentro do orifício final da matriz, conforme Figura 97.

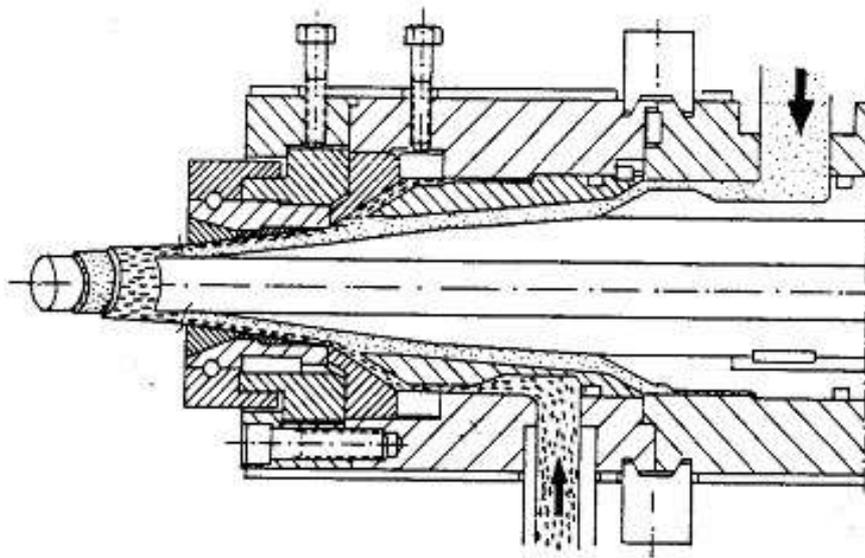


Figura 97. Esquema de uma matriz de co-extrusão com *multimanifold* para capeamento de fios.

A vantagem deste sistema é que polímeros com grandes diferenças em propriedades de fluxo podem ser combinados com mínima distorção interfacial. Controle individual de espessura das diversas camadas é possível; isto possibilita um maior grau de uniformidade das camadas.

Desvantagens apresentadas por este tipo de projeto: projeto complexo da matriz, maior custo e número limitado de camadas que podem ser combinadas.

A Figura 98 mostra uma matriz “*multimanifold*” para co-extrusão na produção de filmes pelo processo tubular, possibilitando a co-extrusão de três polímeros diferentes.

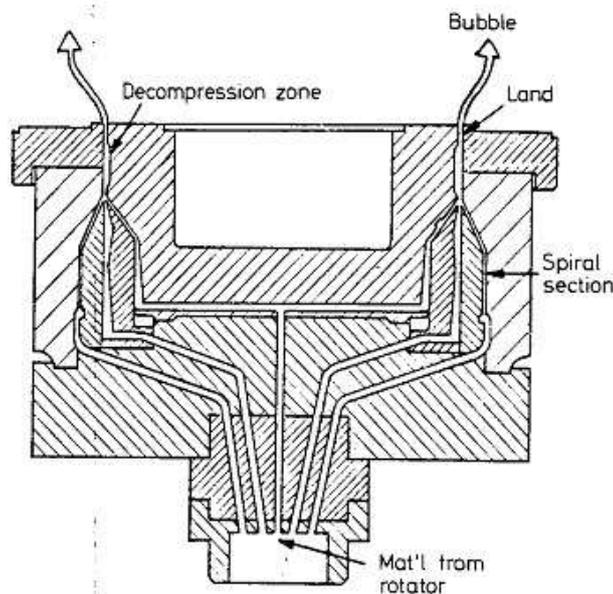


Figura 98. Esquema de matriz de filme tubular multicamadas com *multimanifold*.

A Figura 99 mostra uma matriz “*multimanifold*” para chapas com duas camadas co-extrudadas.

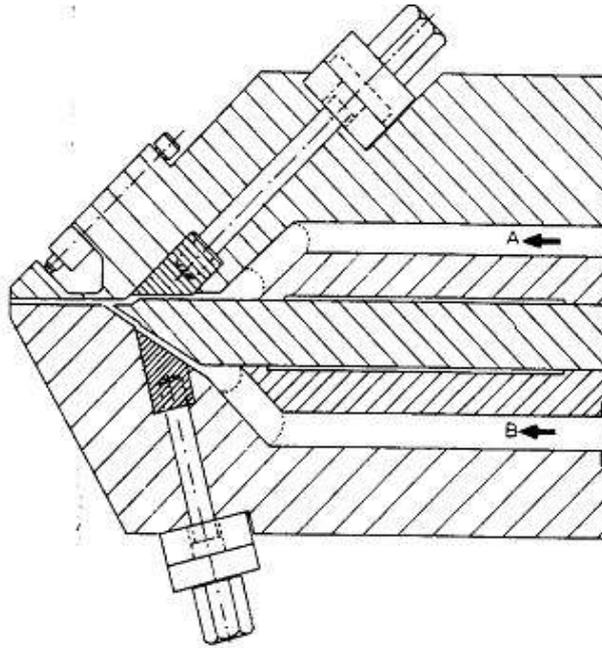


Figura 99. Esquema de matriz de co-extrusão de chapas com *multimanifold*.

Cada camada individual pode ser ajustada com uma barra de obstrução (“*choker bar*”), enquanto a espessura da camada final combinada pode ser ajustada com um “*flex lip*” (ajuste da espessura da fenda de saída da matriz com parafusos).

A Figura 100 mostra uma matriz para co-extrusão de chapas com 3 camadas.

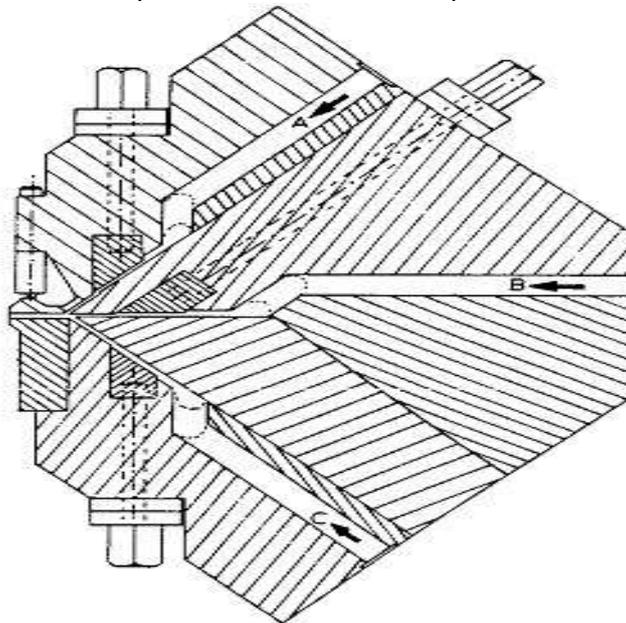


Figura 100. Co-extrusão de chapas (3 camadas).

A Figura 101 mostra um outro projeto de uma matriz para chapas com três camadas.

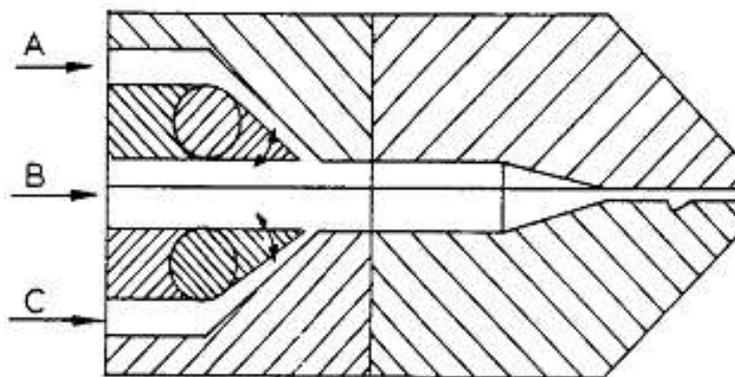


Figura 101. Co-extrusão de chapas (3 camadas).

Neste projeto, a espessura da camada pode ser ajustada por “*die vanes*”. O ajuste interno com “*vanes*” permite um maior grau de ajuste na espessura real global da camada; entretanto, ele não possibilita ajuste local de espessura como é possível com barras de obstrução.

A terceira técnica de co-extrusão usa matrizes com “*multimanifold*” com combinação externa, que têm “*manifolds*” completamente separados para as diferentes correntes de polímero plastificado assim como orifícios distintos através dos quais as correntes deixam a matriz separadamente, unindo-se logo após a saída da matriz.

Esta técnica é também referida como co-extrusão “*multilabial*” (“*multiple lip*”). As camadas são combinadas após saírem da matriz quando ainda estão plastificadas. Em matrizes para filmes planos, rolos de pressão são usados para unir as camadas.

Na extrusão tubular de filmes, a pressão interna de ar fornece a força necessária para a união das camadas. Esta técnica é mais cara do que a técnica de blocos de alimentação. Entretanto, o controle de espessura das camadas individuais é mais preciso, os buracos de agulha (“*pinholes*”) são eliminados, e o sistema é mais fácil de dar a partida.

6 CALIBRADORES

Na extrusão de tubos, a matriz de extrusão é freqüentemente seguida por uma matriz de dimensionamento, onde as reais dimensões do tubo são determinadas. Tal equipamento é geralmente referido como calibrador.

Calibradores são requeridos se o extrudado que sai da matriz tem insuficiente resistência no estado fundido para ser puxado por um sistema de puxamento.

Em um calibrador a vácuo, o vácuo é aplicado para assegurar bom contato entre o calibrador e o extrudado e evitar o colapso deste. O uso de calibrador a vácuo é geralmente mais fácil que o uso de pressão positiva de ar, dentro do extrudado, porque o vácuo é mais fácil de manter a um nível constante. Pressão positiva interna de ar tende a variar com o comprimento do extrudado e é difícil de manter quando o extrudado é cortado em comprimentos pequenos.

Calibradores são úteis quando um controle preciso da forma é necessário. Quando o controle da forma é menos rigoroso, a forma do extrudado é geralmente mantida por suportes colocados na saída da matriz. Inclusive, a forma do extrudado pode ser modificada substancialmente por estes suportes. Isto permite a modificação da forma do extrudado sem mudar a matriz.

Existem 4 tipos de calibradores:

1. Calibradores de deslizamento.
2. Calibradores externos com pressão interna de ar.
3. Calibradores externos a vácuo.
4. Calibradores internos.

Calibradores de deslizamento são usados para perfis simples e abertos. O extrudado permanece em contato com placas frias e o perfil é puxado através do calibrador, causando algum estiramento. Um exemplo de calibrador externo com pressão interna positiva de ar é mostrado na Figura 102.

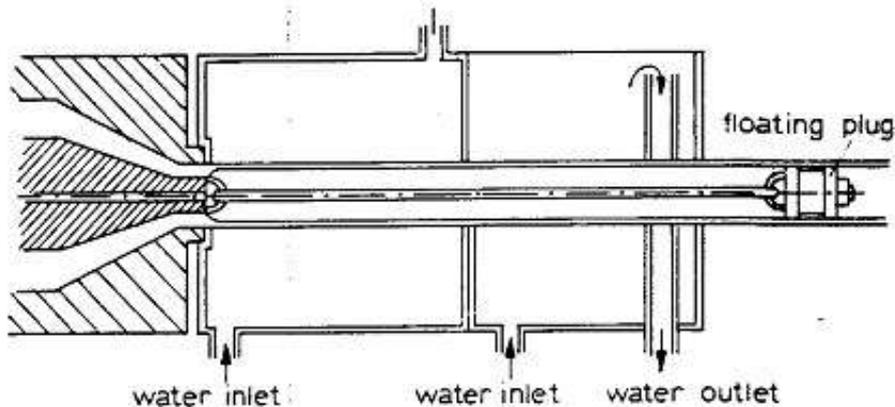


Figura 102. Calibrador com pressão interna positiva.

A pressão de ar é mantida através da vedação com um mandril localizado dentro do extrudado após o calibrador. Este mandril é ligado à parte interna da matriz através de um cabo para fixar sua posição. Este tipo de calibrador é utilizado para tubos de diâmetro maior para PVC ($D > 350$ mm) e PE ($D > 100$ mm).

Um exemplo de calibrador externo a vácuo é apresentado na Figura 103. O perfil é puxado através de aberturas com pressão reduzida aplicada ao extrudado. Esta seção é seguida por uma seção de resfriamento com água. Calibradores externos a vácuo são usados para perfis ocos e para tubos de menor diâmetro.

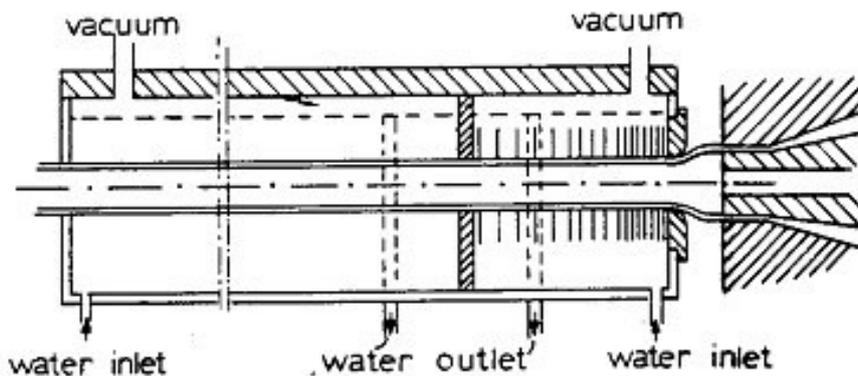


Figura 103. Calibrador com vácuo externo.

Um exemplo de calibrador interno é mostrado na Figura 104. Este calibrador interno modifica a forma anular do extrudado que emerge da matriz fazendo com que este assumira uma forma mais ou menos triangular. Isto permite modificação da forma pelo calibrador. Entretanto, calibração interna não é usada com muita frequência.

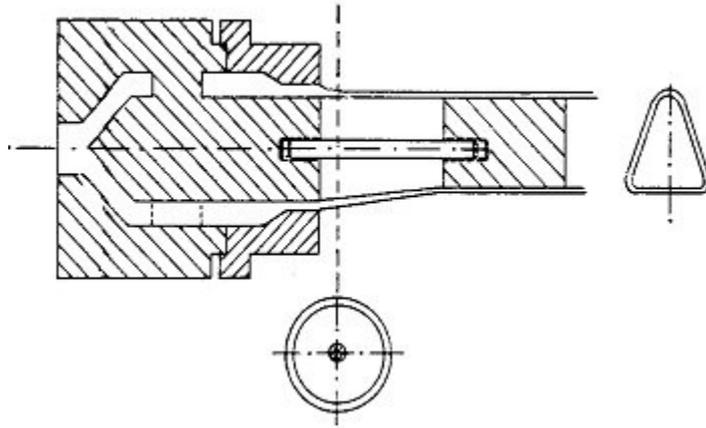


Figura 104. Calibrador interno.