



PROCESSO

DE

EXTRUSÃO

Sumário

1. A MÁQUINA EXTRUSORA: ELEMENTOS, CONTROLES E SEGURANÇA.....	2
1.1 Motor da extrusora e a caixa de redução de velocidades.....	2
1.2 Cilindro / Barril / Canhão e garganta de alimentação.....	4
1.3 Funil de alimentação.....	5
1.4 Rosca.....	6
1.5 Matriz.....	7
1.6 Sistemas de aquecimento e resfriamento.....	9
1.6.1 Aquecimento por resistências elétricas.....	9
1.6.2 Resfriamento da extrusora.....	10
1.7 Instrumentação e Controle de uma máquina extrusora.....	11
1.7.1 Medição da pressão do polímero dentro da extrusora.....	12
1.7.2 Medição da temperatura do polímero dentro da extrusora.....	13
1.7.3 Medições da temperatura do cilindro.....	14
1.7.4 Sistemas de controle das temperaturas.....	14
1.7.5 Velocidade de rotação da rosca.....	15
1.8 Noções gerais de segurança e start-up do processo de extrusão.....	15
1.8.1 Regras básicas de segurança antes de iniciar o processo de extrusão.....	16
2. CONCEITOS REOLÓGICOS E PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS IMPORTANTES PARA O PROCESSAMENTO POR EXTRUSÃO.....	18
2.1 Viscosidade e viscoelasticidade.....	18
2.2 Tempo de recuperação da deformação.....	20
2.3 Índice de Fluidez.....	20
2.4 Densidade aparente.....	20
2.5 Coeficiente de fricção.....	21
2.6 Forma e tamanho das partículas.....	21
3. O PROCESSO DE EXTRUSÃO: TRANSPORTE DE SÓLIDOS, PLASTIFICAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO DO POLÍMERO	22
3.1 Transporte de Sólidos.....	22
3.1.1 Transporte de sólidos induzido por gravidade.....	22
3.1.2 Transporte de sólidos induzido por arraste.....	23
3.2 Plastificação.....	24
3.3 Transporte do polímero fundido.....	25
4. EXTRUSÃO DE FILMES TUBULARES.....	26
4.1 O processo de produção de filmes tubulares.....	26
4.2 Partes da máquina extrusora para produção de filmes tubulares.....	27
4.2.1 Cabeçote.....	27
4.2.2 Torre.....	28
4.2.3 Estabilizadores do balão.....	30
4.2.4 Saia	30
4.2.5 Rolos puxadores	31
4.2.6 Bobinadeira	32
4.3 Variáveis do processo de extrusão de filmes tubulares.....	32
4.3.1 Temperatura da massa fundida (temperatura de extrusão).....	33
4.3.2 Altura do pescoço.....	33
4.3.3 Linha de névoa ou linha de resfriamento (frost line).....	34
4.3.4 Razão de sopro (RS), razão de estiramento longitudinal (RE) e razão de conformação (RC).....	36
4.3.5 Orientação molecular.....	37
4.3.6 Espessura do filme.....	37
4.3.7 Resfriamento do filme tubular.....	38
4.3.8 Tensões de tração impostas ao filme.....	39
4.3.9 Relacionamento entre variáveis de processo, matérias-primas e propriedades dos filmes.....	41
REFERÊNCIAS.....	43

1. A MÁQUINA EXTRUSORA: ELEMENTOS, CONTROLES E SEGURANÇA

A configuração típica de uma extrusora de rosca simples é mostrada na figura 1.1. Nesta figura são apresentados os principais elementos de uma máquina extrusora:

- Motor e caixa de redução de velocidades
- Cilindro
- Garganta de alimentação
- Funil de alimentação
- Rosca
- Matriz
- Elementos de aquecimento e termopares

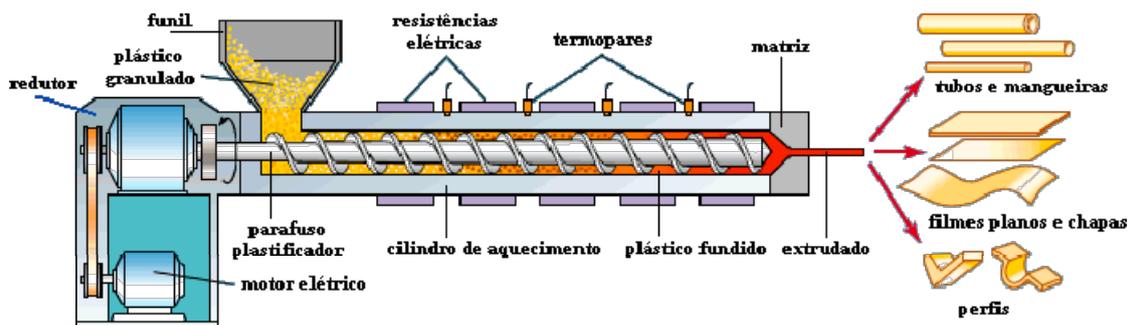


Figura 1.1 - Elementos fundamentais de uma extrusora.

1.1 Motor da extrusora e a caixa de redução de velocidades

O motor é o elemento responsável pelo movimento rotacional da rosca da extrusora. O motor deve garantir uma velocidade constante de rotação da rosca ao longo do processo, visto que variações nesta velocidade resultam em flutuações no fluxo do polímero, provocando variações na qualidade do produto extrudado.

Normalmente, máquinas extrusoras requerem motores com potência na faixa de 5 a 800 HP. No entanto, a potência necessária para forçar o polímero a sair pela matriz é de 5% ou menos de toda a potência consumida pela extrusora [1]. Assim, a grande quantidade de potência requerida é devido a necessidade da extrusora em converter a energia mecânica fornecida pelo motor em energia térmica necessária para plastificar o polímero. Além disto, o motor deve ser capaz de fornecer uma determinada quantidade de torque para promover a rotação da rosca e permitir uma ampla faixa para regulação de velocidades. Uma curva típica de torque para um polímero "de difícil processamento" (A) e um polímero "de fácil processamento" (B) é demonstrada na figura 1.2 [1].

Outros motores, utilizados em diversas partes do processo de extrusão, tais como no acionamento de cilindros tensionadores, sistemas de resfriamento, corte e embobinamento, demandam pouca potência. Nestas aplicações, é necessário que o motor apresente uma precisão nos controles de velocidades, de modo a manter constante as relações com a velocidade de extrusão do polímero - uma sincronia ao longo do processo.

Dentre os principais tipos de motores utilizados em máquinas extrusoras, pode-se citar:

- Motor de corrente contínua (DC);
- Motor de corrente alternada (AC);
- Servo-motores;
- Motor hidráulico¹.

¹ Motores hidráulicos não serão abordados neste texto.

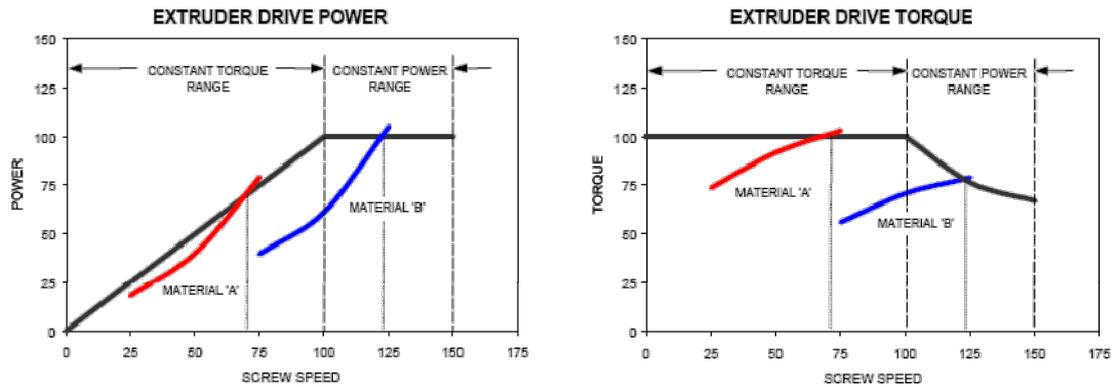


Figura 1.2 - Curvas típicas de potência e torque do motor para dois polímeros diferentes: "A" - fácil processamento e "B" - difícil processamento.

O motor DC é alimentado por uma corrente alternada e, através de um *Retificador de Corrente em Estado Sólido (SCR)*, transforma esta corrente alternada em corrente contínua e controla a voltagem para atingir a velocidade necessária no motor. Isto é esquematicamente apresentado na figura 1.3. Para manter uma alta precisão, controladores de velocidade são incorporados ao sistema. Assim, o motor de corrente contínua pode monitorar, limitar e controlar o torque, pois este é diretamente proporcional à corrente do motor. Como desvantagens, pode ser citado o baixo rendimento do motor e os altos custos de manutenção. As principais vantagens são o baixo custo de aquisição e flexibilidade funcional.

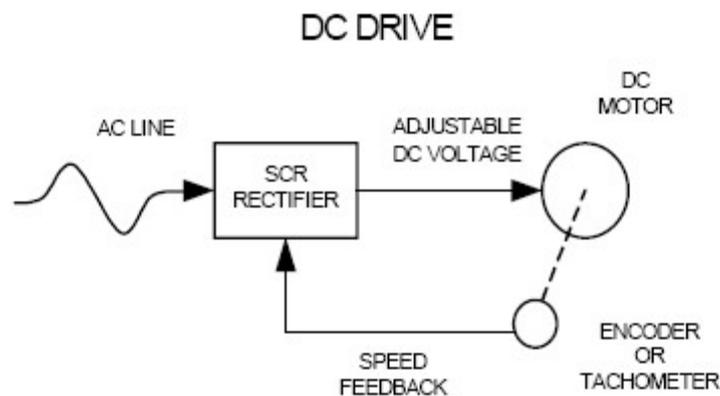


Figura 1.3 - Motor de corrente contínua (DC)

Motores de corrente alternada (AC) também utilizam SCR para transformar a corrente alternada em uma voltagem constante (DC). Após a obtenção de uma voltagem constante, utiliza um *Inversor de Potência em Estado Sólido (SSPI)* para produzir uma frequência ajustável (AC) para controle da velocidade do motor. A figura 1.4 mostra o esquema de funcionamento de um motor de corrente alternada. A principal desvantagem é o alto custo deste tipo de motor, principalmente devido aos sistemas de controle e precisão de velocidades. A principal vantagem é o baixo custo com manutenção.

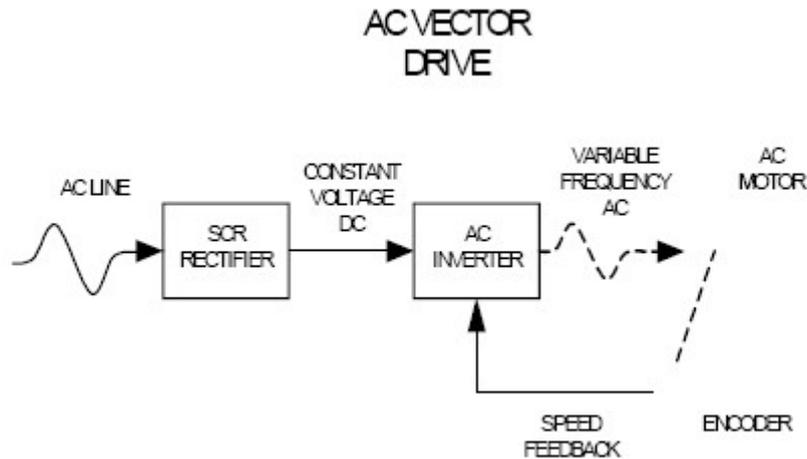


Figura 1.4 - Motor de corrente alternada (AC)

Servo-motores, são motores projetados especificamente para precisos controles de movimentação e velocidade, e a estrutura destes motores é bastante similar à estrutura dos motores de corrente alternada. As vantagens também são semelhantes às dos motores AC, somadas à precisão dos movimentos. As principais desvantagens deste tipo de motor são: o alto custo de aquisição e a complexidade de utilização e manutenção.

Tanto na utilização de motores de corrente contínua (DC) como de corrente alternada (AC), é necessária a incorporação de um redutor de velocidades, conhecido no jargão da indústria de transformação como *caixa redutora*. Este equipamento é necessário para permitir uma proporcionalidade entre a alta velocidade de rotação do motor e a baixa velocidade de rotação da rosca. Típicas *razões de redução* entre rotação do motor e rotação da rosca estão na faixa de 15:1 a 20:1.

O motor da extrusora, na medida do possível, deve ter um acoplamento direto com o redutor de velocidades. Em muitas extrusoras é utilizada uma correia de transmissão de movimentos, o que resulta em perdas de potência (5 a 10%) e "escorregamento" quando ocorrem alterações na velocidade [2,3].

1.2 Cilindro / Barril / Canhão e garganta de alimentação

O barril de uma extrusora, também conhecido por cilindro ou canhão, é um cilindro metálico que comporta a rosca. Como o processo de transformação por extrusão gera uma quantidade muito grande de pressão, é necessário que o cilindro tenha uma alta resistência mecânica, capaz de suportar pressões na faixa de 70 a 140 MPa.

Junto ao cilindro há a garganta de alimentação, que corresponde à parte da extrusora pela qual o material é introduzido no canal da rosca. Em muitas extrusoras não existe uma garganta de alimentação propriamente dita; neste tipo de máquina, a garganta de alimentação é uma parte integral do cilindro da extrusora.

Existindo ou não uma garganta de alimentação propriamente dita, é de extrema importância que nesta região o cilindro seja refrigerado. Isto se faz necessário para evitar o aumento da temperatura nesta região e conseqüentemente da temperatura do polímero. Se a temperatura do polímero, na região da garganta de alimentação, atingir a sua temperatura de amolecimento, as partículas do mesmo irão começar a aderir umas às outras e com o cilindro metálico, provocando uma restrição do fluxo nesta parte da extrusora, conhecido popularmente na indústria de transformação por "jacaré". Desta forma, **é de fundamental importância atentar para o bom funcionamento do sistema de**

refrigeração na entrada do cilindro junto à garganta de alimentação, com propósito de garantir um bom resfriamento desta região e evitar a interrupção do fluxo do polímero.

Outro fator importante, relacionado ao projeto da máquina extrusora, é permitir que o fluxo do material sólido para dentro da extrusora tenha poucas restrições e seja o mais uniforme possível. A seção transversal, de quatro gargantas de alimentação são demonstradas na figura 1.5. A geometria da entrada do cilindro é normalmente ou circular ou quadrangular. Assim, se as geometrias do funil e da garganta de alimentação forem iguais, mais suave será a transição entre estas duas partes da máquina.

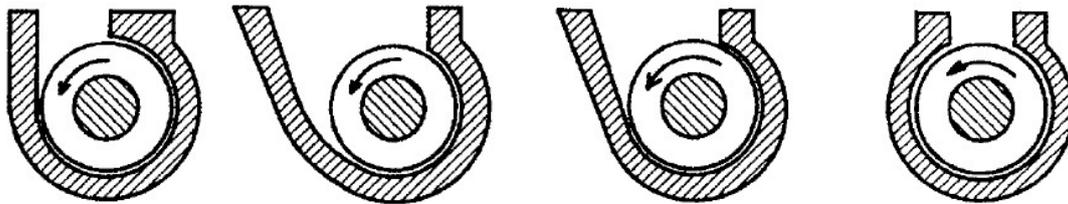


Figura 1.5 - diferentes geometrias de garganta de alimentação de extrusoras

De uma forma geral, há três requerimentos importantes para esta parte da extrusora:

- Excelente capacidade de resfriamento;
- Excelente capacidade de isolamento térmico entre o cilindro e a garganta de alimentação;
- Excelente resistência mecânica para suportar altas pressões.

1.3 Funil de alimentação

O funil de alimentação deve ser projetado de tal forma à proporcionar um fluxo suave do material sólido para dentro da extrusora. Na grande maioria das vezes, o polímero sólido irá fluir livremente devido à ação da gravidade. No entanto, alguns materiais, dependendo da geometria e tamanho das partículas, e demais características, não exibem um fluxo homogêneo e contínuo para dentro da máquina, havendo a necessidade de utilização de equipamentos auxiliares. Algumas vezes, apenas a incorporação de sistemas de vibração no funil permitem ganhos significativos em taxas de fluxo para dentro do cilindro [4]. Exemplos de geometrias de funil de alimentação são apresentados na figura 1.6.

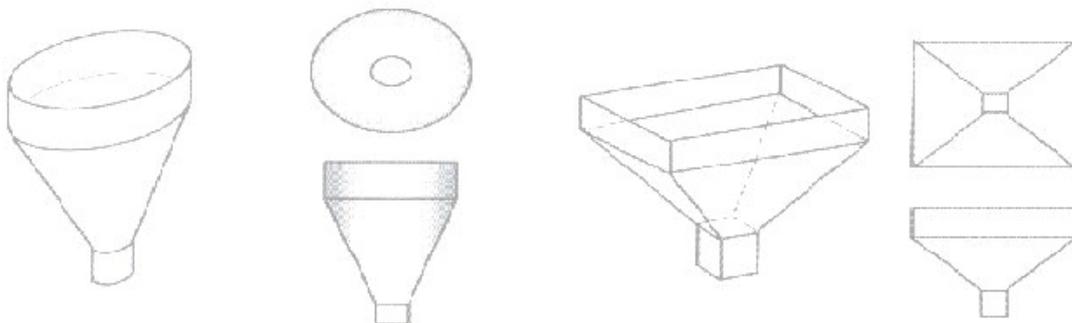


Figura 1.6 - Exemplos de diferentes geometrias para o funil de alimentação de uma máquina extrusora.

No sentido de se obter um fluxo estável e uniforme no funil de alimentação, é necessário que o mesmo tenha uma compressão gradual na região de convergência (no gargalo). Para isto, é importante que o funil tenha seção transversal circular. No entanto, devido à facilidade de fabricação, a maioria dos fabricantes de máquina incorporam funis com geometria quadrangular [2]. Este tipo de geometria de funil funciona bem com *pellets*

de tamanho uniforme; quando grandes variações ocorrem no tamanho das partículas, problemas de transporte por gravidade podem ocorrer. Uma discussão mais detalhada sobre o transporte de sólidos no funil de uma extrusora é apresentada na seção 2.

Também, materiais com baixa densidade aparente tendem a reter o ar entre as partículas. Se o ar não pode escapar durante o fluxo do material através do funil, é necessária a utilização de um funil com sistema de vácuo e rosca auxiliar, como mostrado na figura 1.7.

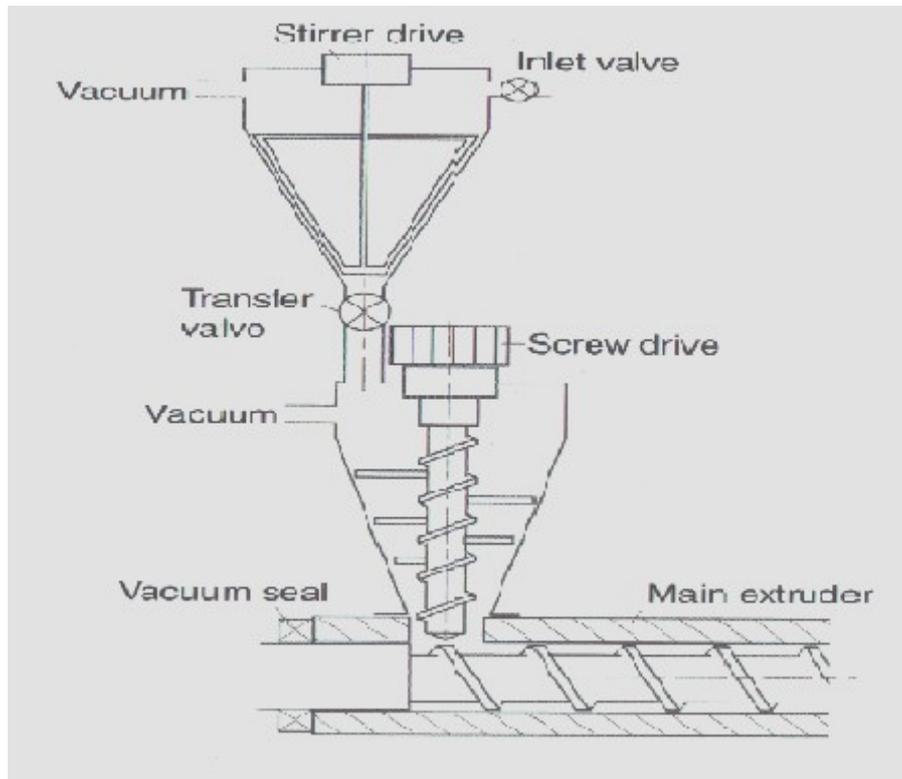


Figura 1.7 - Funil com sistema de alimentação forçada por rosca auxiliar e aplicação de vácuo para retirada de ar entre as partículas durante a alimentação da máquina.

1.4 Rosca

A rosca da extrusora é uma das partes mais importantes da máquina e fica alojada dentro do cilindro, acoplada mecanicamente à caixa de redução (e indiretamente ao motor da extrusora). Em termos simples, a rosca compreende um tarugo de metal de diâmetro variado e com um filete ao seu redor [2], apresentando uma pequena folga em relação ao cilindro. O desenho de uma rosca é apresentado na figura 1.8.

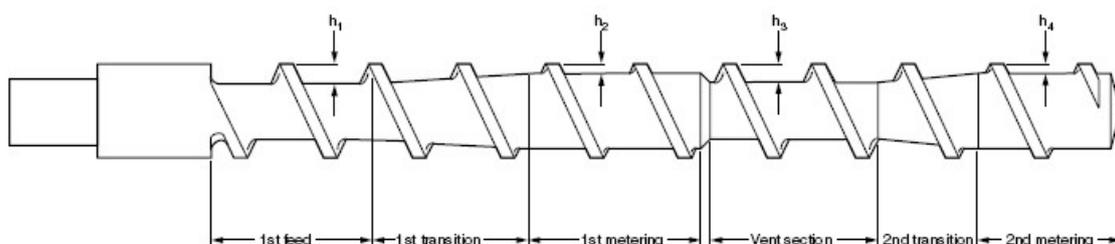


Figura 1.8 - desenho de uma rosca de uma extrusora, apresentando duas seções de compressão e dosagem e uma seção de degasagem.

A rotação da rosca provoca a movimentação do polímero em direção à matriz, contribuindo para a geração de calor para aquecer e plastificar o polímero e proporciona a homogeneização do material plastificado. Assim, o tempo de residência do polímero em uma extrusora é proporcional ao comprimento efetivo da rosca e inversamente proporcional à velocidade da mesma [5].

A rosca de uma extrusora é subdividida em várias zonas de acordo com a geometria do seu canal helicoidal [6]. Na rosca universal, ou de "propósito geral", o passo e a largura do filete, juntamente com o ângulo de hélice e o diâmetro externo, são mantidos constantes, conforme mostrado na figura 1.9. No início da rosca há a *zona de alimentação*, com a função principal de transportar o polímero no estado sólido; a compressão necessária para proporcionar o processo de plastificação é imposta pela diminuição da profundidade do canal da rosca em uma região chamada de *zona de compressão*; após a zona de compressão, existe a *zona de dosagem*, a qual proporciona uma mistura e homogeneização do fluxo do polímero até a entrada da matriz.

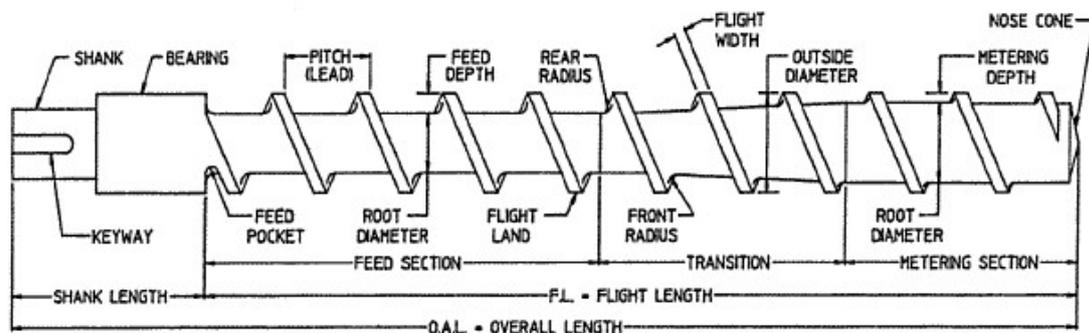


Figura 1.9 - Desenho de uma rosca universal, apresentando as zonas de alimentação, compressão e dosagem.

1.5 Matriz

Em muitas extrusoras, uma placa perfurada e um sistema de telas-filtros são incorporados entre a matriz e o cilindro. A placa perfurada é uma placa metálica espessa composta por muitos orifícios paralelos ao eixo da rosca, pelos quais o polímero plastificado é forçado a passar. Há duas razões principais para o uso de uma placa-perfurada em processos de extrusão [2]:

- Fazer com que o fluxo do polímero, que é em modelo espiralar ao sair do canal da rosca, passe a exibir um modelo de fluxo em linha, evitando problemas de distorções do extrudado;
- Posicionar telas-filtros em frente a placa perfurada, a qual atua como um suporte para a tela-filtro.

O propósito geral do uso de telas-filtros em máquinas extrusoras é filtrar qualquer impureza que esteja junto com a massa polimérica plastificada. No entanto, o uso destas telas-filtro provoca um aumento da pressão na região anterior à matriz, o que proporciona um aumento do grau de mistura da massa plastificada. Uma função secundária do uso de uma placa perfurada é melhorar a transmissão de calor entre o metal e o polímero plastificado, o que pode aumentar a homogeneidade de temperatura no material.

Quando há um problema de ajuste entre a saída do cilindro da extrusora e a entrada da matriz (em termos de dimensões), um adaptador pode ser utilizado. Se a matriz for construída especificamente para uma extrusora, o uso do adaptador pode ser desprezado; no entanto, devido à tendência de padronizações de extrusoras e matrizes, o uso deste dispositivo vem aumentando nestes últimos anos [2,5].

Com relação às telas-filtros, as que apresentam uma malha mais aberta (com número *mesh* menor) são colocadas na parte anterior à placa perfurada, enquanto que a tela que apresenta uma malha mais estreita é colocada na parte posterior à placa perfurada - a análise das posições é sempre referente ao sentido do fluxo do polímero na extrusora. Normalmente é necessário realizar a troca das telas com uma certa frequência. Desta forma, um trocador automático de telas pode ser utilizado. Nestes equipamentos, a variação de pressão é monitorada constantemente. Assim, se variações de pressão fora de valores especificados ocorrer, automaticamente é acionado o dispositivo e uma nova tela, limpa, é posicionada no lugar da tela suja (que estava em uso). Este sistema de troca é conhecido por troca de tela por deslizamento, como mostrado na figura 1.10. Outros dois sistemas de troca de telas são o *autoscreen filter system*, que consiste em uma malha de aço que se move lenta e continuamente através do fluxo do polímero plastificado (figura 1.11), e o sistema rotativo de troca de telas (figura 1.12).

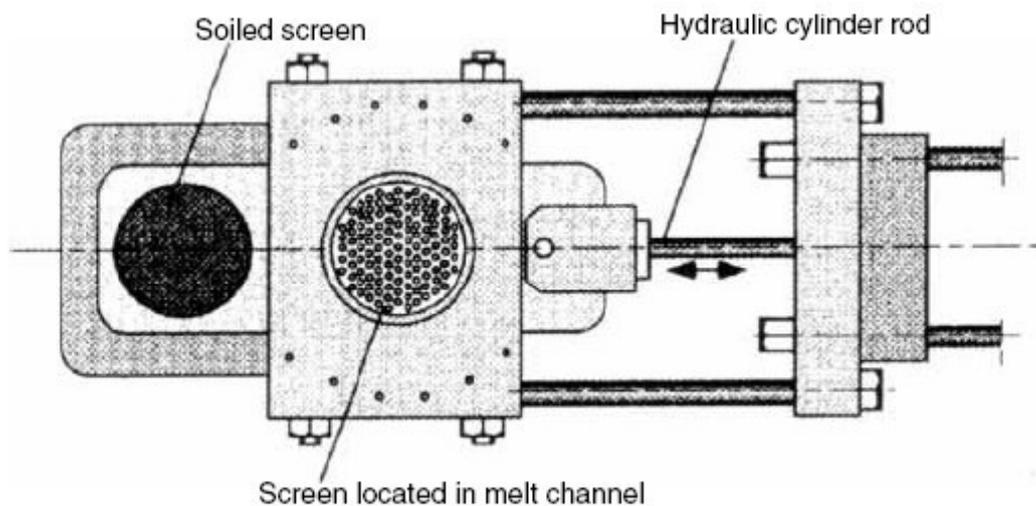


Figura 1.10 - Sistema de troca de tela filtro por deslizamento

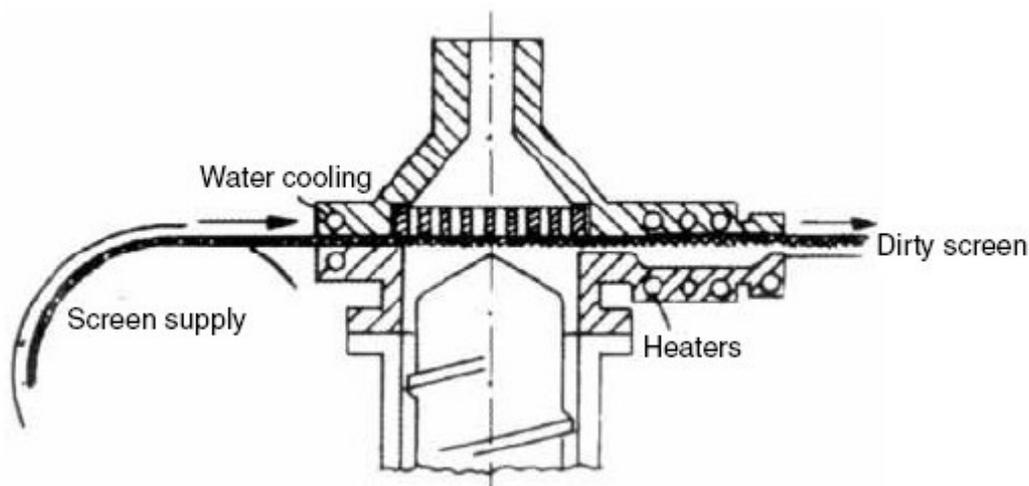


Figura 1.11 - Sistema de troca de tela contínuo

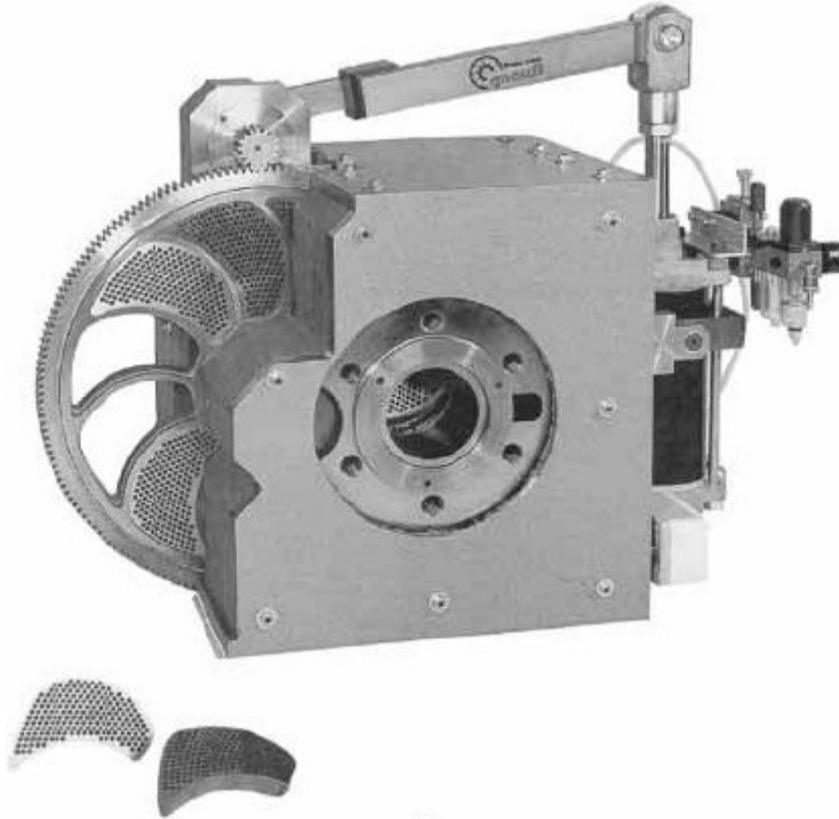


Figura 1.12 - Sistema de troca de tela rotativo

1.6 Sistemas de aquecimento e resfriamento

O aquecimento da máquina extrusora é necessário para trazer a até as condições de processamento do polímero e manter estas condições durante o processamento. Existem muitas formas de promover o aquecimento de uma extrusora, tais como o aquecimento elétrico e por óleo térmico. Por motivo de simplificação, neste texto será abordado somente o aquecimento por resistências elétricas.

O aquecimento elétrico permite ao processador de termoplásticos trabalhar com uma faixa muito ampla de temperaturas, de forma limpa e de fácil manutenção, com baixo custo e boa eficiência. Os aquecedores elétricos são posicionados ao longo do cilindro da extrusora e divididos em *zonas de aquecimento*, podendo cada zona ser composta por duas ou mais unidades de aquecimento. As diferentes zonas de aquecimento são então controladas separadamente, o que permite a **manutenção de um perfil de temperaturas ao longo de toda a extrusora**. Assim, o processador irá programar o perfil de temperaturas da máquina extrusora em função das necessidades de aquecimento do material que irá processar.

1.6.1 Aquecimento por resistências elétricas

Resistência elétrica é a forma mais comum de aquecimento de extrusoras. Este tipo de aquecimento é baseado no princípio da passagem de uma corrente elétrica por um condutor e geração de uma certa quantidade de calor, a qual está relacionada com a resistência apresentada pelo material à passagem desta corrente elétrica. De uma forma simples, a quantidade de calor gerada é:

$$Q_c = I^2 R \quad \text{eq. 1.1}$$

Nesta equação, Q_c é a quantidade de calor gerado, I é a intensidade da corrente e R é a resistividade do material. Assim, por esta equação, verifica-se que há uma relação direta entre a resistividade do material da resistência elétrica e a quantidade de calor gerado.

A eficiência e a vida útil da resistência estão diretamente relacionadas com a área de contato com o cilindro. Um contato não adequado irá provocar um superaquecimento local, o que resultará em desgaste ou "queima" prematura do elemento de aquecimento. Assim, produtos especiais, na forma de pastas, estão disponíveis no mercado para aumentar o contato entre o aquecedor (resistência) e o cilindro da extrusora. Os materiais mais utilizados para a fabricação de resistências elétricas são os cerâmicos, podendo estes suportar potências de até 160 KW/m^2 [3,5].

No entanto, há um problema relacionado com o aquecimento externo do polímero por resistências elétricas, pois este tipo de aquecimento está associado com altos gradientes de temperatura (variações de temperatura), principalmente em materiais com baixa condutibilidade térmica. Ou seja, para aquecer o polímero via aquecedores externos é muito demorado e envolve altas diferenças de temperaturas, e esta combinação de alta temperatura e longos tempos de aquecimento aumentam as chances de ocorrer a termo-degradação do polímero [2,5].

1.6.2 Resfriamento da extrusora

O resfriamento da máquina extrusora é muitas vezes necessário. No entanto, este resfriamento provoca uma redução na eficiência energética do processo, pois o resfriamento significa perda de energia. Desta forma, o aquecimento da máquina extrusora contribui para reduzir o consumo de energia para transportar, plastificar e homogeneizar o polímero, enquanto que o resfriamento retira a energia do sistema.

O movimento de rotação da rosca provoca o aquecimento do polímero por atrito, o que consiste em transformação de energia mecânica em energia térmica. A energia mecânica normalmente contribui com 70 - 80% da energia total necessária para plastificar o polímero, o que significa que os aquecedores do cilindro contribuem com apenas 20 - 30%. Assim, se a grande maioria da energia é fornecida pela rotação da rosca, há uma razoável chance de que a geração local de energia interna no polímero seja maior do que à necessária para manter a temperatura desejada durante o processamento. Portanto, alguma forma de resfriamento é necessária, tal como os ventiladores mostrados na figura 1.13. Muitas extrusoras apresentam nervuras na superfície entre as resistências, o que permite um aumento da área superficial e uma maior capacidade de transferência de calor para o ambiente, aumentando a eficiência do resfriamento. Porém, quando altas taxas de resfriamento são necessárias, a utilização de fluidos refrigerantes, tais como água, óleo e ar forçado podem ser utilizados.

O importante é lembrar que, como o resfriamento da extrusora significa perda de energia, este procedimento deve ser minimizado o quanto for possível.

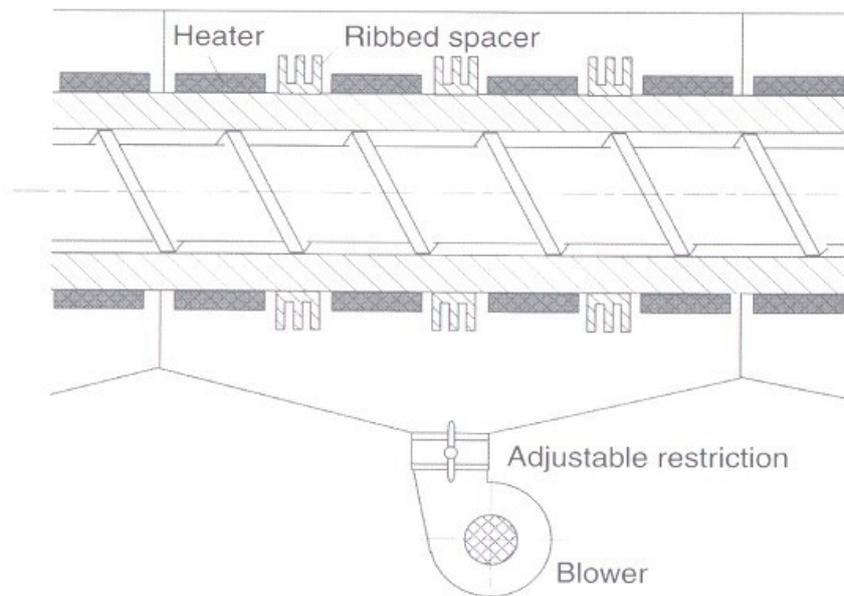


Figura 1.13 - sistema de ventiladores (ventoinhas) para resfriamento do cilindro de uma extrusora.

1.7 Instrumentação e Controle de uma máquina extrusora

O nível de controle do processo de extrusão está diretamente relacionado com a capacidade de medição e ajustes dos instrumentos da máquina. Para se conseguir isto, não basta apenas medir os parâmetros do processo, mas também utilizar os sensores, transdutores e medidores certos e posicioná-los nos locais corretos.

Do ponto de vista do processo, a instrumentação e controle da extrusora é um dos componentes mais críticos de toda a máquina [3]. Quando um problema ocorre na extrusora, é muito difícil determinar a causa e o local exato do problema. Desta forma, a instrumentação torna possível verificar o que está acontecendo dentro da máquina, permitindo ao operador atuar no processo de forma a solucionar os problemas.

As variáveis de processamento por extrusão são:

- Taxa de alimentação do polímero no estado sólido
- Taxa de aquecimento;
- Taxa de cisalhamento;
- Temperatura do polímero - *medição direta*;
- Pressão do polímero fundido antes e após o conjunto de telas - *medição direta*;
- Taxa de escoamento do polímero pela matriz;
- Taxa de resfriamento;

Os principais parâmetros de máquina, os quais são utilizados como indicadores das variáveis de processamento que não podem ser determinadas no processamento, são:

- Velocidade de rotação da rosca;
- Temperatura do polímero fundido na matriz;
- Temperaturas ao longo do cilindro e na matriz;
- Consumo de potência em cada zona de aquecimento;
- Potência consumida no motor;
- Temperatura do fluido de resfriamento ou do ar ambiente;
- Velocidade do fluido de resfriamento;

É claro que estes parâmetros dizem respeito somente à máquina extrusora. No entanto, há muitos outros parâmetros de processo em uma linha completa de extrusão (relativos aos componentes após a matriz). Porém, há alguns parâmetros que são comuns à todas as linhas de extrusão, tais como:

- Velocidade da linha de produção;
- Dimensões do produto extrudado;
- Tensão na linha de produção.

Como base para todos os processos de extrusão, os principais parâmetros de interesse são a pressão absoluta e a temperatura do polímero, bem como a instabilidade de suas medições ao longo do tempo. Se a temperatura e a pressão do polímero fundido variarem, isto significa que o processo de extrusão não está estabilizado, e a taxa de vazão, a consistência do fluxo e a qualidade do fundido também apresentarão variações [7]. Desta forma, fica evidente a necessidade de se **controlar o processo de extrusão através dos parâmetros de máquina e de processamento**, com o propósito de permitir a **identificação de problemas** o mais rápido possível, evitando falhas na qualidade do produto e perda de tempo, o que sempre resulta em **altos custos de produção**. A instrumentação da máquina extrusora portanto permite que os problemas sejam identificados antes de provocarem danos mais sérios ao equipamento e à qualidade do produto, além de permitir a **caracterização do processo para otimização e desenvolvimento**.

1.7.1 Medição da pressão do polímero dentro da extrusora

A medição da pressão do polímero em uma extrusora é importante por duas razões básicas: **controle do processo e segurança**. A pressão na matriz da extrusora determina a vazão da máquina, ou seja, é a pressão necessária para superar a resistência ao escoamento do polímero imposta pela matriz. Assim, uma pressão estável irá proporcionar um fluxo estável, enquanto que variações na pressão irão provocar variações na vazão do polímero pela matriz e nas dimensões do produto extrudado, como mostrado na figura 1.14.

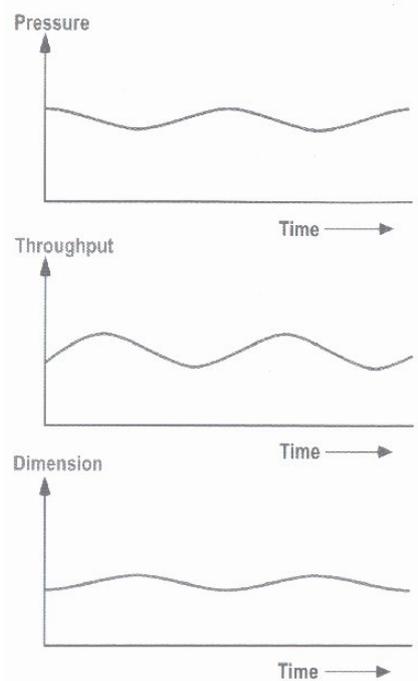


Figura 1.14 - Influência de variações de pressão no cilindro da extrusora e influência na vazão e dimensões do produto.

Outro fator crítico é monitorar a pressão em função da segurança da operação de extrusão, pois as **altas pressões geradas durante o processamento podem provocar uma explosão**. Nestes casos, o cilindro pode romper ou a matriz pode ser empurrada para longe da extrusora; situações extremamente perigosas e que devem ser evitadas.

A medição da pressão em uma extrusora é realizada por um transdutor de pressão. A localização mais crítica deste equipamento para proporcionar medições de pressões excessivas é antes da placa perfurada. A grande maioria destes transdutores são elétricos e utilizam medidores de deformação de um diafragma para correlacionar com a pressão do polímero. Nestes transdutores, a pressão do polímero fundido deforma o diafragma, e esta deformação é medida, como mostrado na figura 1.15. Uma vez que estes medidores de deformação não podem ser expostos à altas temperaturas, estes devem ficar afastados do polímero fundido ou das paredes do cilindro. Portanto, uma ligação mecânica ou hidráulica é utilizada para transmitir a deformação do diafragma até o medidor de deformação. A desvantagem destes tipos de transdutores eletrônicos é que eles são caros e susceptíveis a danos. Os danos são gerados devido ao contato entre o diafragma (que é extremamente fino) e o polímero fundido.

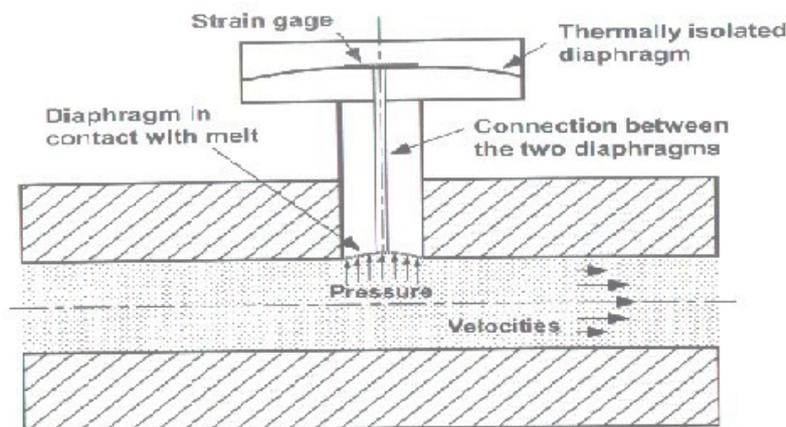


Figura 1.15 - Transdutor de pressão de medição por deformação de diafragma, utilizado para verificar a pressão do polímero fundido dentro do cilindro de uma extrusora.

1.7.2 Medição da temperatura do polímero dentro da extrusora

A temperatura do polímero fundido é a temperatura mais importante do processo de extrusão. No entanto, existem muitas formas de monitorar a temperatura do polímero durante o processo. A temperatura pode ser medida com sensores resistivos (condutivo e semi-condutor), termopares e pirômetros.

Ambos os sensores resistivos operam segundo o princípio de que a resistividade térmica do material de construção do sensor varia com a temperatura. O sensor resistivo do tipo condutivo utiliza um elemento metálico para medir a temperatura. A resistividade térmica de muitos metais aumenta com a temperatura; assim, pela medição da resistência, pode-se determinar a temperatura medida. O sensor tipo semi-condutor opera segundo o princípio de que a resistividade térmica do material de construção do sensor diminui com o aumento da temperatura.

Termopares são também conhecidos como transdutores termo-elétricos. Neste tipo de sensor, um par de fios metálicos de materiais diferentes são unidos pelas extremidades (junção sensorial), enquanto que as outras extremidades são acopladas à terminais (junção de referência), mantidos à uma temperatura constante (temperatura de referência). Quando há uma diferença de temperatura entre a junção sensorial e a junção de referência, uma voltagem é produzida. Este fenômeno é conhecido como efeito termo-

elétrico, e a intensidade da voltagem produzida depende da diferença de temperatura e dos metais utilizados. Exemplos de configurações de termopares estão mostrados nas figuras 1.16.

Para medir a temperatura do polímero que sai pela matriz, medidores de contato (tais como termopares e sensores resistivos) não são aplicados devido aos danos que provocam na qualidade do produto. Assim, para medições nas quais o contato não é permitido, o uso da termometria infravermelha é de fundamental importância. No entanto, medidores via termometria infravermelha também podem ser utilizados para medir a temperatura do polímero dentro da extrusora.

1.7.3 Medições da temperatura do cilindro

Deve-se realizar medições da temperatura do cilindro para verificar o perfil de temperatura ao longo da extrusora e fornecer indicadores para os controladores, de forma a acionar o funcionamento de dispositivos de aquecimento (caso a temperatura esteja abaixo do valor programado) ou resfriamento (caso a temperatura esteja acima do valor programado). Desta forma, o medidor de temperatura deve ser posicionado o mais próximo possível da superfície interna do cilindro.

Na medição da temperatura do cilindro, o sensor é posicionado em um poço (furo) no cilindro da extrusora. A grande maioria destes sensores são construídos com revestimento metálico para obter resistência mecânica; porém erros de medição podem ocorrer devido à condução térmica do material de construção do sensor.

1.7.4 Sistemas de controle das temperaturas

No processo de extrusão, a variável a ser monitorada é medida e esta informação é passada para uma unidade de controle. Desta unidade de controle, um sinal é enviado a um atuador que ajusta o processo de forma que o valor da variável fique próxima do valor desejado. Logo, há duas formas de manter uma variável dentro de certos limites: o método liga e desliga ou método de ajustamento contínuo.

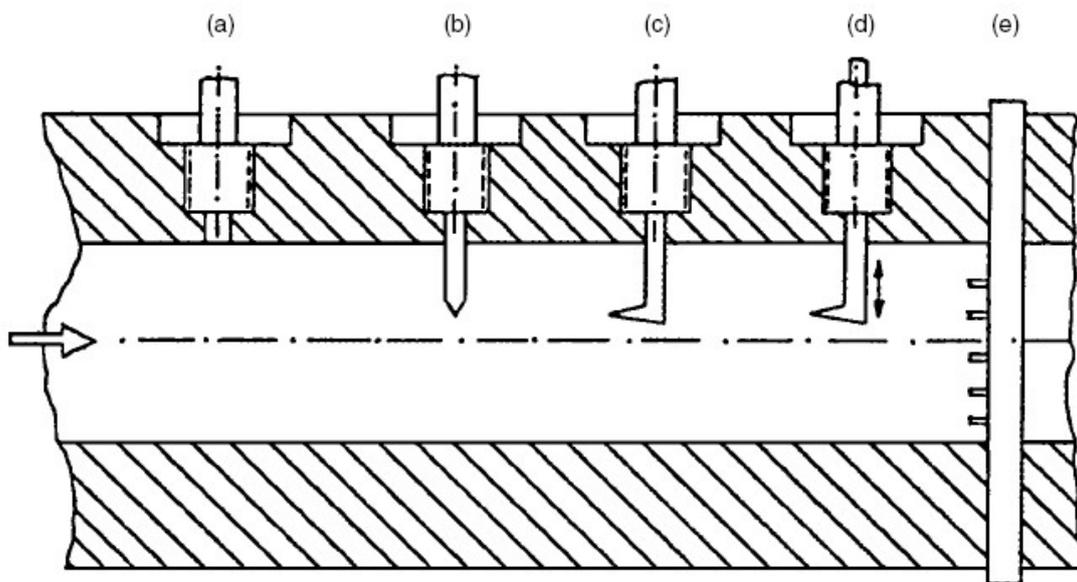


Figura 1.16 - Diferentes configurações de termopares e seus posicionamentos no cilindro de uma extrusora. Verifique que, para evitar danos ao termopar que está em contato com o polímero, o mesmo é posicionado em regiões que não podem entrar em contato com a rosca.

Em controladores de temperatura do tipo liga e desliga, a potência dos aquecedores é a máxima quando a temperatura medida é menor do que a temperatura programada; quando a temperatura medida é maior do que a temperatura programada, os aquecedores são desligados. Desta forma, a temperatura medida fica variando em torno do valor da temperatura programada [3].

Um dos problemas de controlar a temperatura da extrusora pelo sistema liga e desliga é a grande defasagem térmica devido ao aquecimento e ao resfriamento da extrusora. Para evitar este problema, um sistema de controle é necessário para ajustar a potência de aquecimento conforme a necessidade. Assim, os controles proporcionais permitem um ajustamento contínuo da potência de aquecimento (de 0 a 100%) dependendo da temperatura real. A faixa de temperatura sobre a qual a potência é ajustada de 0 a 100% é chamada de banda proporcional, geralmente centrada na temperatura programada. Variações do sistema proporcional permitem a introdução de fatores de correção (integral e derivativo) para diminuir o tempo de resposta do sistema de aquecimento.

1.7.5 Velocidade de rotação da rosca

A produção de uma extrusora é determinada diretamente pela velocidade de rotação da rosca; é importante, portanto, que a velocidade da rosca seja precisamente medida. É recomendável que a sensibilidade e a resolução das medições de velocidade da rosca seja de no mínimo 0,1 rotações por minuto [2].

1.8 Noções gerais de segurança e start-up do processo de extrusão

Todos os processos de extrusão, sejam de filmes tubulares, chapas, perfis e outros, envolvem riscos de acidentes, e a combinação de calor, pressão e polímero fundido sob certas circunstâncias pode ser perigosa [8]. Desta forma, antes de iniciar o processo, é necessário que os operadores tomem todas as medidas necessárias para que a segurança da operação seja garantida - medidas estas específicas para cada máquina extrusora em particular. O primeiro ponto importante é garantir que as instruções de operação da máquina sejam rigidamente seguidas, principalmente aquelas relacionadas aos equipamentos de proteção do operador e da máquina, procedimentos operacionais padrão e de segurança, calibração de instrumentos de medição, e práticas eficientes de manutenção e reparos. A tabela 1.1 apresenta alguns riscos envolvidos em atividades inerentes ao processo de extrusão.

Operação	Riscos	Ações
Alimentação da extrusora	Incêndio Tropeço durante o transporte	Evitar derramar o polímero sobre os aquecedores ou no chão Limpar com vácuo, não com vassoura ou ar comprimido
Alimentação com polímero em pó	Incêndio ou explosão Intoxicação	Evitar derramamentos Evitar a formação de eletricidade estática Não fumar Utilizar máscaras contra poeira
Desobstruir a alimentação da máquina	Ferimento e estragos na máquina se a rosca em rotação for tocada	Não remover a grade de segurança Não se apoiar no funil Utilize somente longos pedaços ou tiras de polímeros, nunca metais
Excesso de pressão resultando em vazamento do polímero fundido pelas junções mecânicas da máquina	Incêndio se entrar em contato com os aquecedores Acidentes se o flange romper Queimaduras com o polímero fundido sendo arremessado pela matriz	Parar ou reduzir a velocidade da máquina Utilizar luvas e óculos de proteção Nunca se posicionar na frente da matriz, mesmo com a máquina parada
Contato acidental com o cilindro aquecido ou com os aquecedores	Queimaduras	Evitar contato com estas partes da máquina Utilizar luvas e sapatos de segurança Colocar avisos de riscos de queimadura nestas regiões da máquina
Contato com o polímero fundido	Queimaduras na pele Ferimentos nos olhos	Evitar o contato Utilizar luvas, óculos e sapato de proteção
Contato com dispositivos elétricos expostos	Choque elétrico Ferimentos por queimaduras e decorrentes da descarga elétrica	Utilizar luvas Manter os cabos isolados e suspensos quando as proteções forem removidas Isolar os aquecedores quando a cobertura for removida
Movimentos mecânicos ou queda de componentes	Cortes e amputações, principalmente dos dedos. Esmagamentos, principalmente dos pés	Isolar o motor da extrusora. Utilizar luvas e sapatos de segurança. Evitar colocar as mãos e os pés em partes da máquina que estejam em movimento, tais como a rosca ou motor da extrusora.

Tabela 1.1 - Operações e riscos envolvidos durante a operação em processo de extrusão - adaptado de Stevens e Covas, 1995.

Antes de qualquer outra atividade, o operador deve verificar se a rosca da extrusora está posicionada corretamente dentro do cilindro - o início da rosca deve estar alinhado com a parte posterior da abertura de alimentação. Então, é necessário verificar se a matriz está bem conectada e alinhada com o cilindro, e se os termopares e demais sensores estão todos posicionados corretamente e conectados ao painel de controle. Também, acionar o sistema de resfriamento da região da garganta de alimentação, programar e ligar o sistema de aquecimento e alimentar a máquina com uma quantidade de material suficiente para dar início ao processamento.

Quando a temperatura medida pelos termopares atingir a temperatura programada (o que pode levar uma hora ou mais, dependendo da extrusora), o motor pode ser acionado à baixas velocidades de rotação, verificando-se sempre a corrente consumida (sobre-carga) - se a corrente medida no motor estiver próxima de um valor limite, é necessário parar imediatamente a máquina, seja para esperar que a máquina aqueça mais um pouco ou para investigar a causa do problema. Se o polímero fundido sair pela matriz, isto indica que a

matriz está limpa e que é possível alimentar a máquina, mas lentamente. Se o polímero não sair pela matriz, isto significa que a máquina está vazia e cuidados devem ser tomados para certificar-se de que a matriz não está entupida. O operador deveria derramar os grânulos poliméricos com as mãos para dentro da garganta de alimentação, mas não para permitir o preenchimento completo do canal da rosca; isto pois o polímero irá atravessar todo o comprimento da extrusora (viajar pela rosca) rapidamente, sem tempo para fundir-se completamente, e se então forçado para dentro da matriz quando a rosca estiver preenchida, este pode bloquear a matriz com partículas não fundidas, provocando o rompimento das junções ou danos à matriz [5].

1.8.1 Regras básicas de segurança antes de iniciar o processo de extrusão

1. Nunca remova ou pinte os dispositivos de alerta de perigo. Eles são instalados para avisar os operadores e demais pessoas sobre possíveis riscos durante o processamento;
2. Plataformas, passarelas, corrimãos, barreiras e grades devem estar nos locais adequados antes de iniciar o processamento;
3. Nunca suba, posicione-se ou fique de pé em locais que não foram apropriadamente projetados, sem escadas, degraus e plataformas e corrimãos;
4. Corredores e saídas de emergência devem estar limpos e livres de obstáculos. Remova óleo, graxa ou água no chão da fábrica - um ambiente organizado é mais seguro;
5. Os acessos à extintores de incêndio e equipamentos de segurança deve ser facilitados;
6. Mantenha as roupas e todas as partes do corpo longe de mecanismos em movimento (rosca, motores, rolos puxadores, bobinadeiras), juntas, guias, etc;
7. Tome cuidado para não bater a cabeça em obstáculos aéreos ao redor da máquina - se necessário, utilize capacete;
8. Correntes de ar vindas de motores podem transportar poeira ou outras partículas que podem provocar danos e ferimentos aos olhos - utilize óculos de segurança quando necessário;
9. Não acione nenhum equipamento até que todas as pessoas envolvidas com o processo estejam atrás das faixas de segurança;
10. Fique o mais afastado possível de fontes de calor (sistema de aquecimento e polímero fundido);
11. Cuidado quando o cilindro da extrusora é resfriado com ar forçado (ventiladores) - o ar próximo ao cilindro pode estar superaquecido podendo provocar queimaduras;
12. Utilize luvas resistentes à altas temperaturas quando for fazer qualquer atividade de manutenção na extrusora, mesmo que você acredite que ela esteja fria;
13. Use proteção quando utilizar sistemas de redução de velocidades;
14. Não suba na máquina quando esta estiver em processamento - utilize passarelas ou plataformas para fazer qualquer inspeção visual;
15. Sempre mantenha o conjunto de telas filtro limpo, pois se estas estiverem obstruídas, podem restringir o fluxo do polímero fundido e aumentar a pressão dentro do cilindro, podendo haver riscos de vazamentos e acidentes;
16. Nunca olhe a garganta de alimentação através da abertura do funil durante o processamento sem um anteparo para a face - problemas graves ao operador podem resultar da ejeção de *pellets* ou liberação gases;
17. Nunca coloque as mãos dentro do funil de alimentação com a máquina em processo;
18. A melhor maneira de evitar a obstrução do fluxo do polímero do funil para a rosca é permitir que a região da garganta de alimentação tenha um resfriamento adequado. Caso ocorra uma obstrução do fluxo do polímero, desligue e trave o motor da extrusora, esvazie o funil e retire os *pellets* remanescentes da garganta de alimentação;

19. O motor da extrusora necessita de alta voltagem elétrica, e alta voltagem elétrica pode provocar sérios danos à saúde e até a morte do operador. A extrusora deve ser corretamente aterrada e todas as fiações verificadas periodicamente;
20. Nunca inicie o processamento com as coberturas do cilindro e das resistências elétricas fora do lugar;
21. Certifique-se de que os operadores da extrusora tenham visualização e acesso facilitado ao painel de controle da máquina;

2. CONCEITOS REOLÓGICOS E PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS IMPORTANTES PARA O PROCESSAMENTO POR EXTRUSÃO

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo dos materiais. Nesta seção serão abordados os princípios básicos e equações sobre reologia aplicada ao processamento de polímeros, enfatizando aqueles que são relevantes no processamento por extrusão

2.1 Viscosidade e viscoelasticidade

Quando um fluido é submetido a uma tensão (força aplicada sobre uma área), este é deformado continuamente durante o tempo no qual a tensão é aplicada, diferentemente de um sólido perfeito, o qual deforma uma quantidade fixa, independente do tempo. Com a remoção da tensão, o fluido permanece no estado deformado, enquanto que um sólido elástico recupera suas dimensões originais completa e instantaneamente. Desta forma, a rigidez ou módulo, a qual é a relação entre tensão e deformação, possui um valor único para os sólidos perfeitos (elásticos). No entanto, para um fluido, este depende do tempo no qual a tensão é aplicada. Assim, com uma tensão constante aplicada em um fluido, a taxa de deformação também é constante em relação ao tempo, e a razão entre a tensão e a deformação é a **viscosidade**.

Se um elemento do fluido, como mostrado na figura 2.1, é submetido a uma tensão de cisalhamento, a taxa de cisalhamento pode ser assumida como sendo o gradiente de velocidade (dV/dy) surgindo através da espessura (dy) do elemento de fluido. Isto é:

$$\gamma = dV/dy$$

eq. 2.1

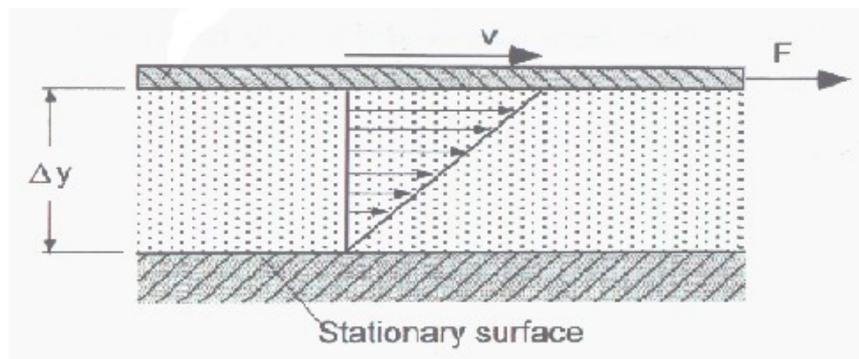


Figura 2.1 - Modelo de deformação encontrado durante o processamento de polímeros por extrusão.

Nesta equação, γ é a taxa de cisalhamento (deformação por unidade de tempo). Dentro destas considerações, com uma força de cisalhamento (F) atuando sobre uma área (A), a tensão de cisalhamento (τ) é dada por:

$$\tau = F/A$$

eq. 2.2

Fluidos onde a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional a taxa de cisalhamento ($\tau = \gamma \cdot \text{constante}$) são chamados de **Newtonianos**. Para tais fluidos, a constante de proporcionalidade (a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento) é denominada como **viscosidade**. Assim, para um fluido Newtoniano, temos:

$$\tau / \gamma = \eta$$

eq. 2.3

Onde η é a viscosidade, e o gráfico de τ versus γ é uma linha reta com inclinação η , passando através da origem, como mostrado na figura 2.2.

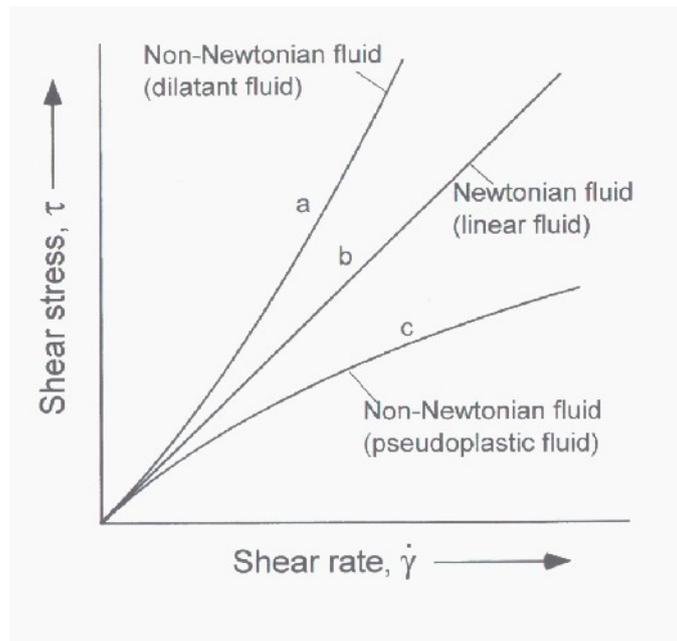


Figura 2.2 - Relação entre taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento para os fluidos com comportamento newtoniano, dilatante e pseudoplástico.

Para a maioria dos polímeros fundidos, a tensão de cisalhamento não é proporcional a taxa de cisalhamento, apresentando geralmente uma **diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento**. Este tipo de comportamento é chamado de **pseudoplasticidade**, e o fluido é denominado de pseudoplástico, conforme apresentado na figura 2.2. A definição de **viscosidade**, como sendo uma **medida de resistência ao escoamento**, ainda é utilizada, mas esta também é uma função da temperatura do polímero[5]. Uma aproximação, a qual é frequentemente utilizada para expressar a tensão de cisalhamento, é a **Lei das Potências**:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad \text{eq. 2.4}$$

Nesta equação, K é uma constante específica do material e dependente da temperatura, e n é o **índice de lei das potências**. Se o valor de n for igual a 1, o fluido é considerado Newtoniano. Se o valor de n for maior que a unidade, o fluido é dito **dilatante** (apresenta um aumento na viscosidade com o aumento da tensão de cisalhamento - normalmente encontrados em misturas de PVC em pó com plastificantes líquidos). Se o valor de n for menor do que a unidade, o fluido é denominado de **pseudoplástico**, conforme apresentado na figura 2.2.

O grau com que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento depende da estrutura física e química das moléculas, tais como presença de ramificações, grupos laterais, grupos polares, peso molecular médio e distribuição do peso molecular e presença de aditivos. Moléculas com peso molecular médio muito alto, apresentando grupos laterais volumosos, com ramificações ou com ligações químicas fortes, possuem uma maior resistência ao escoamento em comparação à moléculas lineares e de baixo peso molecular médio. Isto se deve ao fato de cada molécula ocupar um espaço específico em equilíbrio entre as forças de repulsão e atração, o que gera uma espécie de "tubo" pelo qual a macromolécula pode mover-se de forma sinuosa, com maior ou menor facilidade, em função da estruturação momentânea e das características físico-químicas do sistema [9].

Viscoelasticidade é um comportamento ou resposta à deformação, onde, ao mesmo tempo, observa-se comportamento viscoso (o corpo deforma e não recupera nada da deformação depois da retirada da tensão) e comportamento elástico (ocorre total

recuperação da deformação após a remoção da tensão) [7]. No estado fundido, os polímeros apresentam primeiramente um comportamento viscoso, com traços de recuperação elástica - ou seja, parte da deformação é recuperada após o alívio da tensão, seja ela de tração, compressão ou cisalhamento. Este efeito viscoelástico é pronunciado em polímeros fundidos devido às estruturas macromoleculares. Efeitos viscoelásticos, tais como o inchamento do extrudado, fratura do fundido e *pele de cação* serão abordados durante este texto.

Portanto, o conhecimento do modo como o polímero flui quando submetido a uma deformação por cisalhamento é de fundamental importância para a determinação de sua aplicabilidade em produtos e processos específicos.

2.2 Tempo de recuperação da deformação

O tempo de relaxação (t^*) está associado ao comportamento viscoelástico dos polímeros. Quando um polímero está sendo extrudado, por exemplo, se a temperatura do perfil ao sair pela matriz for mantida alta durante um tempo longo, as moléculas recuperam toda a deformação sofrida durante o fluxo dentro dos canais da matriz, e esta recuperação aparece na forma de inchamento do extrudado, bem como resulta em ausência de tensões internas e orientação molecular. Por meio de ensaios dinâmico-mecânicos esse tempo de relaxação pode ser estimado em função da temperatura. Tempos de relaxação pequenos estão associados a viscosidades mais baixas e tempos de relaxação maiores estão associados a viscosidades e módulos elásticos elevados [9].

2.3 Índice de Fluidiez

O Índice de Fluidiez (IF) ou *melt flow rate* é uma medida da fluidiez dos polímeros muito utilizado para controle da qualidade de materiais poliméricos, atuando também como uma forma de padrão para classificação dos polímeros quanto à aplicabilidade de processabilidade. O índice de fluidiez corresponde ao número de gramas de polímero extrudado em um período de tempo de 10 minutos em um reômetro capilar [2]. Detalhes sobre características do equipamento e procedimentos de testes são descritos na norma ASTM D 1238.

2.4 Densidade aparente

A densidade aparente é a densidade das partículas poliméricas incluindo os vazios, preenchidos por ar, entre as partículas. Materiais com baixa densidade aparente (com muito ar entre as partículas) tendem a provocar problemas de transporte de sólidos durante a extrusão, tanto na garganta de alimentação quanto na zona de alimentação da extrusora. Partículas poliméricas com geometria irregular tendem a apresentar baixa densidade aparente; quando a densidade aparente é baixa, o fluxo em massa não é bom, de forma que a alimentação da extrusora fica comprometida, bem como problemas de preenchimento de canal da rosca e plastificação, e flutuação de pressão podem ocorrer.

Uma boa medida da densidade aparente e de como esta afeta o fluxo a seco de materiais particulados (principalmente polímeros) é o **ângulo dinâmico de repouso**. Neste tipo de medida, uma determinada quantidade de material na forma de partículas (pó, grânulos, *pellets*) é vazada sobre uma superfície. Após o vazamento, o material é submetido à uma vibração, a qual provoca um re-arranjo das partículas. Se durante este re-arranjo o ângulo formado entre a superfície e às partículas for maior que 45° , o material é dito de baixa fluidiez à seco. Se o ângulo formado for inferior a 45° , o material é dito de boa fluidiez à seco. Isto é ilustrado esquematicamente na figura 2.3.

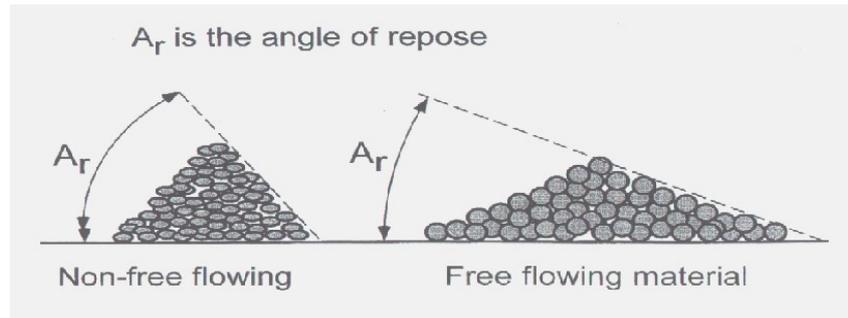


Figura 2.3 - ângulo dinâmico de repouso, que corresponde a uma medida da capacidade de escoamento de materiais particulados. Quanto menor for o ângulo dinâmico de repouso, melhores são as características de escoamento das partículas.

2.5 Coeficiente de fricção

O coeficiente de fricção de partículas poliméricas pode ser classificado em coeficiente de fricção interno e coeficiente de fricção externo. O coeficiente de fricção interno diz respeito à dificuldade de escorregamento entre as partículas poliméricas (a medida da resistência presente quando uma camada de partículas desliza sobre outra camada de partículas do mesmo material [2,5]). O coeficiente de atrito externo relaciona a dificuldade de escorregamento entre a interface das partículas poliméricas e às paredes de um material de diferente construção.

2.6 Forma e tamanho das partículas

A gama de partículas poliméricas usadas em extrusão é um tanto grande, de em torno de 1 micrometro a até 10 milímetros [2]. A forma das partículas pode ser geralmente estabelecida por uma simples observação visual ou pelo uso de um microscópio. Não importando a forma do material (pó, grânulos, *pellets*), é importante que as partículas do material tenham a forma de um cubo com os cantos arredondados [4], pois este tipo de geometria permite uma boa capacidade de escoamento e boa densidade aparente. Partículas de forma esférica, embora fluírem bem, retém muito ar, o que contribui para uma baixa densidade aparente; por outro lado, partículas cúbicas proporcionam alto **fator de empacotamento**, mas baixa capacidade de escoamento, o que geralmente resulta em problemas de transporte do material por gravidade do funil para a rosca.

3. O PROCESSO DE EXTRUSÃO: TRANSPORTE DE SÓLIDOS, PLASTIFICAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO DO POLÍMERO

Nesta seção será realizada uma análise funcional do processo de extrusão, iniciando com o transporte de sólidos do funil de alimentação até a rosca, transporte de sólidos na seção de alimentação da rosca, mecanismo de plastificação e homogeneização do polímero, apresentando-se exemplos dos efeitos que as variáveis de processo e de máquina provocam nestas etapas do processo.

3.1 Transporte de Sólidos

A zona de transporte de sólidos em uma extrusora estende-se desde o funil até boa parte da rosca, dentro do cilindro, pois os primeiros traços de fusão do polímero geralmente não aparecem antes de uma distância de três diâmetros da rosca para dentro do cilindro, medida a partir da garganta de alimentação [2]. Uma vez que os mecanismos que envolvem o transporte de sólidos no funil da extrusora e na rosca são diferentes, este transporte pode ser dividido em *zona de transporte de sólidos induzido por gravidade* (no funil) e *zona de transporte de sólidos induzido por arraste* (rosca da extrusora).

3.1.1 Transporte de sólidos induzido por gravidade

O funil de uma extrusora normalmente possui sua abertura superior cilíndrica e uma seção inferior cônica e truncada, o que muitas vezes dificulta o transporte por gravidade. Assim, as propriedades da massa polimérica sólida (*bulk*) e na geometria do funil de alimentação poder-se-ia calcular a distribuição de tensões no funil, o perfil de velocidades de escoamento na garganta de alimentação e a taxa de descarga de sólidos para dentro da extrusora. No entanto, devido à complexidade da análise de escoamento de materiais particulados, estes cálculos são muito complicados e os resultados geralmente não condizem com a realidade.

Durante o fluxo das partículas pelo funil, normalmente dois modelos de fluxo são identificados: *fluxo em massa* e *fluxo por encanamento*. No fluxo em massa (figura 3.1), todas as partículas movimentam-se em direção à saída do funil (garganta de alimentação), de forma que o material desce homogêneo para o cilindro, sem a formação de regiões com material estagnado. Já no modelo de fluxo por encanamento (tubo), as partículas fluem através de um "canal de fluxo"; as paredes do canal de fluxo são formadas por partículas estacionárias. Isto significa que neste modelo de fluxo as partículas que estão mais próximas da parede do funil apresentam velocidade zero ou próximo de zero, enquanto que as partículas no centro do funil fluem com velocidade constante para dentro da garganta de alimentação (figura 3.1).

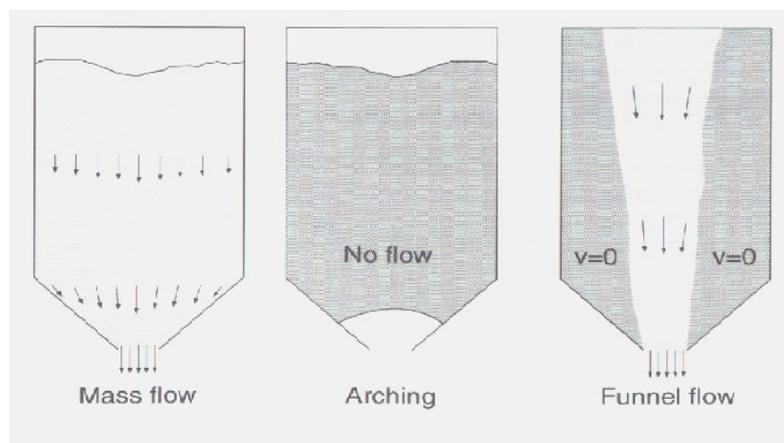


Figura 3.1 - Modelos de fluxo de materiais particulados no funil de uma máquina extrusora - fluxo em massa, arqueamento e fluxo em tubo.

Um problema bastante comum que ocorre durante o escoamento das partículas pelo funil é o arqueamento. Este problema consiste na formação de uma "ponte" natural próxima à garganta de alimentação capaz de suportar o peso de todo o material que está no funil. Assim, com a formação desta "ponte" nenhum material flui para dentro do cilindro, o que provoca uma restrição do fluxo de material pela garganta de alimentação. Este tipo de problema, que ocorre com materiais que apresentam alta coesividade é apresentado na figura 3.1. Para minimizar a ocorrência destes problemas, existe uma regra que deve ser seguida no projeto do funil - para materiais na forma de *pellets* o ângulo das paredes do funil deve ser de 45°, para materiais na forma de pó o ângulo deve ser de 60° [4]. Para minimizar a ocorrência de problemas de transporte de sólidos no funil da extrusora, alternativas como vibração, agitação e alimentação forçada são muito eficientes.

Durante o fluxo induzido por gravidade, um perfil de pressão desenvolve-se na massa polimérica sólida contida no funil. Flutuações de pressão na entrada da garganta de alimentação, provocadas por variações na quantidade de material dentro do funil ou por dificuldades de fluxo, resultam em variações na taxa de extrusão, consumo de energia e temperatura do polímero fundido [5]. Também, a capacidade de descarga de material do funil para dentro do cilindro determina a máxima vazão possível da extrusora.

3.1.2 Transporte de sólidos induzido por arraste

Quando o polímero no estado sólido cai no canal da rosca, após passar pela garganta de alimentação, o mecanismo de transporte deixa de ser o induzido pela gravidade e passa a ser induzido por arraste (atrito). O material, no canal da rosca, irá se movimentar para frente como resultado do movimento relativo entre a superfície do cilindro e a superfície da rosca. As partículas são compactadas rapidamente dentro do canal da rosca pois o polímero é transportado contra uma certa pressão, a qual aumenta ao longo da zona de transporte de sólidos. Uma vez que todo o material dentro do canal da rosca esteja compactado, todas as partículas, em qualquer ponto da seção transversal, irão movimentar-se com a mesma velocidade; ou seja, não há deformação do leito de partículas dentro do canal da rosca. Se ocorrerem deformações no leito de partículas dentro do canal da rosca, isto resultará em flutuações de pressão dentro do cilindro. Desta forma, a taxa de fluxo do material sólido é determinada pela força atuante sobre o material, principalmente a força de atrito atuante entre as partículas e as superfícies, e pela taxa de compactação do mesmo no canal da rosca.

Se não houver pressão suficiente dentro do canal da rosca, as partículas não irão formar um leito compactado. Neste caso, o chamado *plug flow* não irá ocorrer - modelo de fluxo no qual todos os elementos do fluido movimentam-se com a mesma velocidade, sem a presença de cisalhamento. Ou seja, irá ocorrer deformação no leito de material sólido, tornando o transporte de sólidos menos instável. Este tipo de transporte de sólidos no canal da rosca, no qual o leito de partículas não está completamente compactado, é conhecido como "*transporte Arquimediano*", e irá ocorrer sempre que a taxa de entrada de material para dentro da extrusora for menor do que a capacidade de transporte de sólidos da rosca. Desta forma, o transporte Arquimediano está sempre relacionado com o preenchimento parcial do canal da rosca da extrusora, sem a completa compactação do leito de partículas [2].

Para a otimização do transporte de sólidos, as partículas poliméricas devem compactar fácil e rapidamente e movimentarem-se todas com a mesma velocidade. Neste momento é importante notar que, por exemplo, partículas poliméricas que apresentaram boas características de fluxo volumétrico no funil, devido a forma esférica, poderão apresentar problemas de compactação devido à baixa densidade aparente.

Como já foi discutido, existem duas forças de atrito principais atuando no transporte de sólidos induzido por arraste: uma na superfície do cilindro e outra a superfície da rosca. A força de atrito no cilindro é a força motriz do movimento da região sólida, enquanto a força de atrito na superfície da rosca retarda o seu movimento. Se a força de atrito no cilindro fosse nula, as partículas poliméricas girariam junto com a rosca e nunca se moveria para frente. Assim, para ocorrer a movimentação do material pela rosca, é necessário que as forças de atrito no cilindro sejam maiores do que na rosca, ou seja, a superfície do cilindro deve ser mais rugosa [10].

O aumento da temperatura das paredes do cilindro em geral provoca uma redução no coeficiente de atrito externo do polímero (entre o polímero e a superfície do cilindro), como pode ser visto na figura 3.2. Esta diminuição no coeficiente de atrito externo provoca uma diminuição na taxa de transporte do polímero na região de transporte de sólidos, resultando em um aumento no tempo de residência do polímero dentro da extrusora, diminuindo a taxa de produção geral da extrusora.

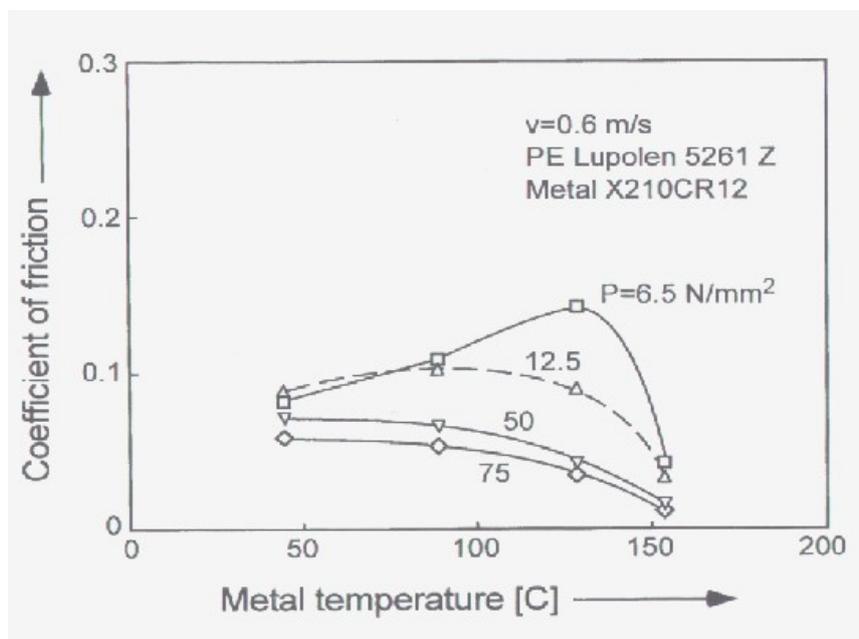


Figura 3.2 - Variação do coeficiente de atrito da parede do cilindro em função da temperatura e da pressão aplicada sobre o polímero, para polietileno em uma extrusora com velocidade tangencial de rotação da rosca de 0,6 m/s.

Também, o atrito entre o polímero no estado sólido e a superfície do cilindro resulta em geração de calor, de forma que a temperatura na interface entre o material e o cilindro metálico seja substancialmente maior do que a temperatura indicada no painel de controle da máquina.

3.2 Plastificação

Durante o processo de extrusão, quando o polímero cai no canal da rosca este é compactado progressivamente, como se fosse um sólido elástico. Esta região pode ser dividida em duas zonas distintas. A primeira zona é **zona de retardo**, na qual ocorre a formação de um fino filme de polímero fundido na interface do leito de partículas compactado com a superfície do cilindro. A segunda zona, na qual ocorre a completa plastificação do polímero, é denominada de **zona de plastificação efetiva**. Combinada com a pequena espessura do filme fundido formado, a grande velocidade relativa entre a movimentação as partículas poliméricas e do cilindro provoca um substancial aumento da

dissipação viscosa de calor, que corresponde a dissipação da energia mecânica em um fluido viscoso.

A figura 3.3 mostra esquematicamente a zona de plastificação de uma extrusora, apresentando a seção transversal do canal da rosca. Nesta zona, o material sólido e o material plastificado estão segregados. O polímero ainda no estado sólido se acumula em um bloco bem compacto, enquanto que o polímero fundido forma um leito fundido. A espessura do fino filme plastificado cresce ao longo da região sólida para acomodar o crescente volume de material que é plastificado. A taxa de plastificação é maior quanto mais rápido for a remoção do material recém fundido da região de formação do filme fundido. Na figura 3.4 podemos observar que a fusão ocorre somente junto à superfície do cilindro, embora na prática verifica-se que ocorre plastificação junto à superfície da rosca [5].

O filme que entre a superfície do cilindro e o leito de partículas compactado aumenta em espessura na direção do leito de fundido, como um resultado da velocidade relativa entre a rosca e o cilindro, o que força o fundido para trás em direção ao flanco ativo do filete. Com a continuação da rotação da rosca e conseqüente plastificação do polímero, o leito de material fundido aumenta em largura e o leito de partículas diminui. As partículas sólidas são continuamente distorcidas e compactadas e, geralmente, o leito de partículas colapsa (é quebrado) prematuramente, e os fragmentos são envolvidos por polímero fundido, até que todo o material seja plastificado.

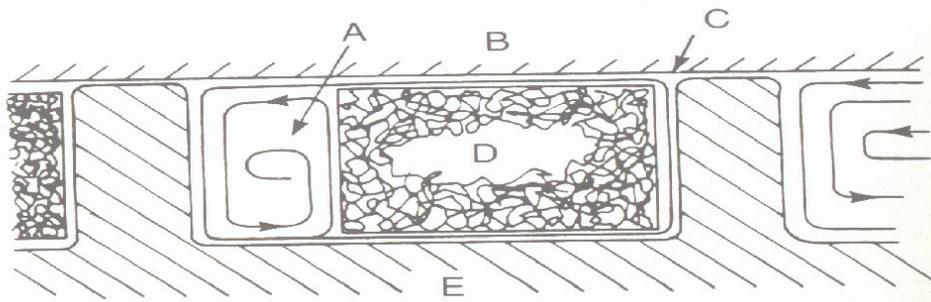


Figura 3.3 - corte transversal do canal de uma rosca de extrusora, apresentando: A) leito de polímero fundido; B) cilindro metálico; C) fino filme formado na interface polímero/cilindro; D) ilha de material plastificado; E) rosca da extrusora.

A plastificação do polímero pode ser otimizada pelos parâmetros de processamento e pela incorporação de elementos específicos na rosca da extrusora. A compressão do polímero, tanto no estado sólido quanto fundido, a geração de calor tanto pelas resistências quanto pela dissipação viscosa contribuem para uma boa eficiência da plastificação. Em alguns casos pode ser necessário aumentar a velocidade de rotação da rosca para proporcionar uma maior deformação por cisalhamento e conseqüentemente gerar mais calor por atrito para diminuir a viscosidade do polímero e melhorar a mistura.

3.3 Transporte do polímero fundido

A zona de transporte de fundido de uma extrusora inicia quando o processo de plastificação tenha sido completado. Esta zona de transporte de fundido também é conhecida como zona de bombeamento, pois o polímero fundido é transportado até a matriz contra uma pressão considerável. Importante nesta etapa do processo é que o polímero esteja com um fluxo estável pelos canais da rosca e com uma temperatura homogênea, não provocando variações na taxa de extrusão e conseqüentemente nas dimensões do produto final.

4. EXTRUSÃO DE FILMES TUBULARES

Os filmes plásticos são empregados na produção de sacolas, sacos, embalagens, rótulos, adesivos, revestimentos em geral, entre outras aplicações. Dentre todas as técnicas de obtenção de filmes plásticos, duas se destacam:

- Filmes planos
- Filmes tubulares

Neste texto serão abordados apenas os aspectos teóricos e práticos sobre o processamento de filmes tubulares, iniciando com a descrição geral do processo, partes da máquina, variáveis de processamento e parâmetros de máquina, e relação entre processamento, matérias-primas e características dos filmes produzidos.

4.1 O processo de produção de filmes tubulares

A diferença existente entre um filme produzido pelo processo plano convencional e um filme produzido pelo processo tubular é o equilíbrio de propriedades mecânicas nos sentidos longitudinal e transversal proporcionado pelo processamento tubular.

Neste tipo de processo, o polímero é extrudado através de uma matriz anular (circular) formando um fino tubo de 50 milímetros à 2 metros de diâmetro, e de 0,2 a 1,0 milímetro em espessura, o qual é inflado com ar comprimido proveniente do centro da matriz, proporcionando assim uma expansão radial do "balão" formado. A expansão do balão ocorre até que a seção considerada do filme esteja completamente solidificada, definindo-se assim a largura do filme.

O filme tubular é resfriado e solidificado com auxílio de ar forçado que sai de um anel localizado ao redor do tubo extrudado, equipamento este conhecido por anel de resfriamento. Durante a ascensão do filme até os rolos puxadores no alto da torre, ocorre um resfriamento complementar do filme. Também, a espessura do filme é definida pelo estiramento do polímero na longitudinal (sentido da máquina) pelos rolos puxadores.

Os rolos puxadores, com auxílio de roletes ou barras de achatamento (conhecido no jargão industrial como saia), achatam o balão, o qual pode ser bobinado ainda duplo ou cortado ao meio para formar dois filmes planos, os quais são bobinados em duas bobinas diferentes. O esquema de uma linha de extrusão de filmes é mostrado na figura 4.1.

A extrusão do polímero pode-se dar das seguintes formas:

- Vertical ascendente
- Vertical descendente
- Horizontal

O processo horizontal é muito pouco utilizado devido às dificuldades encontradas com relação à distribuição de espessura do filme e a necessidade de espaço físico para as instalações da máquina. Desta forma, a extrusão ascendente é a mais utilizada na indústria de transformação de filmes tubulares. Neste tipo de extrusão, destacam-se o processamento de polietilenos de alta, baixa e linear de baixa densidades. O processo de extrusão descendente é empregado basicamente na produção de filmes de polipropileno devido à necessidade de resfriamento por água, permitindo assim uma redução no grau de cristalinidade e melhorando a transparência do filme.

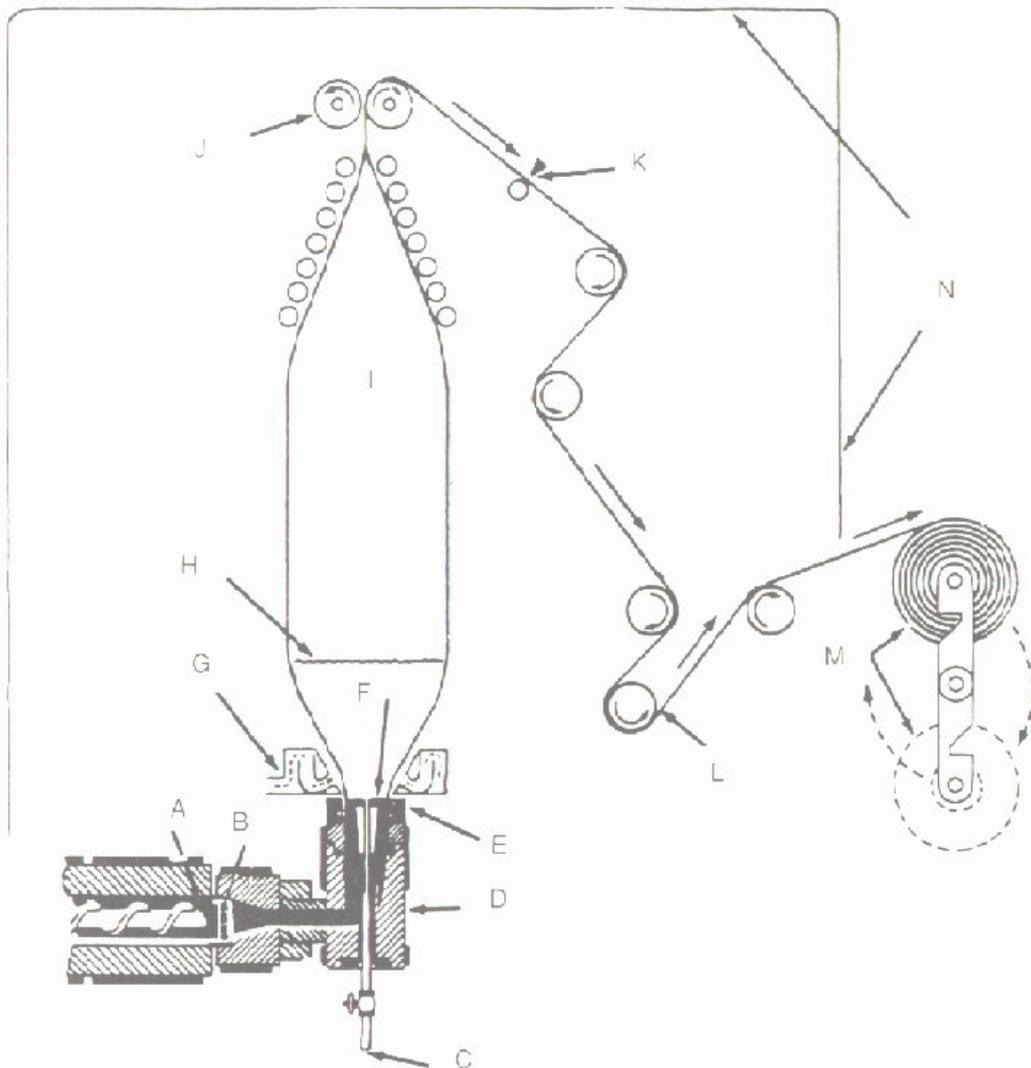


Figura 4.1 - Esquema de uma linha de produção de filmes tubulares, apresentando:
 A) conjunto de telas; B) placa perfurada; C) entrada de ar para insuflamento do balão,
 D) cabeçote; E) matriz; F) entrada de ar para o balão; G) anel de resfriamento; H) linha de névoa;
 I) balão; J) rolos puxadores; K) tratamento superficial do filme; L) rolo tensionador;
 M) bobinadeira; N) estrutura de apoio da linha de extrusão.

4.2 Partes da máquina extrusora para produção de filmes tubulares

Com relação a máquina extrusora, esta é praticamente idêntica a qualquer outro processo de extrusão, com a função de plastificar o material, homogeneizar a massa polimérica e transporta-la até a matriz, deixando o material na temperatura ideal para o processamento [10]. No entanto, a partir da matriz de extrusão as configurações começam a mudar, tornando-se específicas para este tipo de processamento. Desta forma, abaixo serão discutidas questões relativas aos equipamentos específicos para a produção de filmes tubulares.

4.2.1 Cabeçote

Nas máquinas para a produção de filmes tubulares, dá-se o nome de cabeçote para um conjunto onde estão montados a matriz, o anel de resfriamento, resistências elétricas e termopares, entrada de ar para insuflamento do balão, além de alguns outros elementos

[10]. No jargão do chão de fábrica, é muito comum denominar a matriz por cabeçote, ou vice-versa.

É no flange, ou adaptador, local onde se encontra a placa filtro e o sistema de troca de telas, onde conectamos o cabeçote à matriz. Também, devido às variações que ocorrem nos parâmetros de processo durante a extrusão, pode ocorrer variações na espessura do filme produzido. Uma alternativa, portanto, para distribuir a desuniformidade da bobina e, conseqüentemente, produzir uma bobina simétrica, é o uso de cabeçotes giratórios.

A matriz circular (anular) é composta de duas partes concêntricas, e a passagem do polímero plastificado se dá pelo canal formado por estas duas partes. A parte interna, normalmente de geometria cônica, é denominada de mandril interno ou pino central. A figura 4.2 mostra duas geometrias de matriz para filmes tubulares (a) matriz de alimentação lateral e (b) matriz de alimentação axial tipo espiral.

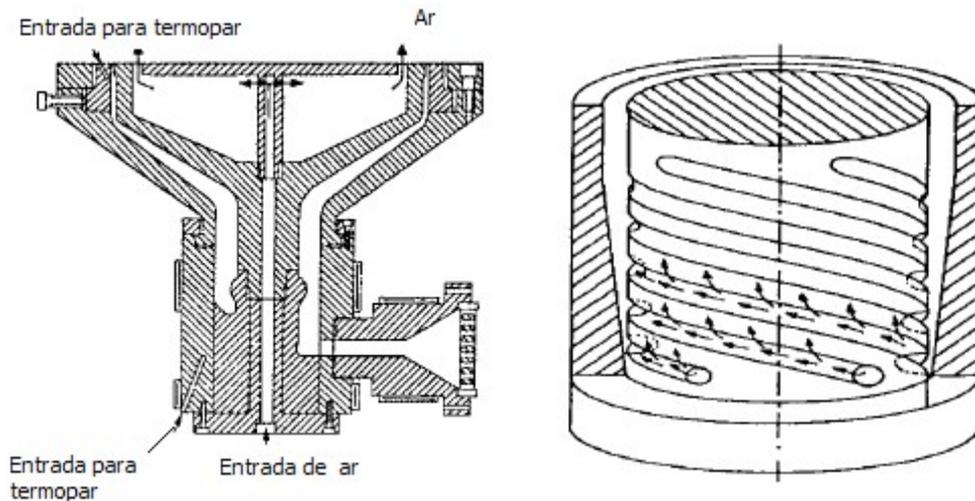


Figura 4.2 - Matrizes para produção de filmes tubulares
(a) matriz de alimentação lateral e (b) matriz de alimentação em espiral.

A superfície das duas partes da matriz devem ser muito bem polidas para assegurar uma maior facilidade de processamento e obtenção de propriedades finais no filme, bem como possuir geometria que permita um fluxo contínuo do polímero, sem cantos vivos e pontos mortos. Geralmente a uniformidade do fluxo do polímero, em uma matriz de filmes tubulares, é melhorada significativamente pelo aumento do número de canais helicoidais (em espiral).

Uma grande parte da queda de pressão em linhas de extrusão ocorre na região da matriz. Conseqüentemente, canais de escoamento mais largos necessitam ser utilizados para polímeros com alto peso molecular, tais como polietileno linear de baixa densidade e alguns polietilenos de alta densidade [5]. Também, as matrizes com alimentação em espiral são mais adequadas ao processamento de polietilenos por possibilitarem uma melhor homogeneização da massa de polímero fundido e, com a incorporação de zonas de relaxação entre os canais e a saída da matriz, permitem uma eliminação das tensões geradas devido ao escoamento do polímero pelos canais [2, 5]. Estas tensões resultam nas chamadas "linhas de memória", as quais fragilizam o filme e o tornam facilmente rasgável.

Após a saída do polímero pelo orifício da matriz, o balão formado deve ser resfriado. Este resfriamento externo é conseguido através da convecção de ar emergente de um anel de resfriamento montado diretamente na saída da matriz. O volume, a velocidade e a direção do fluxo de ar, e também a sua temperatura, determinam a eficácia do resfriamento.

Para uma estabilização do processo e a obtenção de propriedades ótimas para o filme, é necessário que o balão tenha um resfriamento uniforme. Estas características são obtidas com um bom projeto do anel de resfriamento que contenha um sistema adequado de labirintos, com equalizadores de pressão e defletores internos. Com isto, é possível a obtenção de velocidades e distribuição uniforme do ar sobre o balão [10]. Para proporcionar um controle mais efetivo dos parâmetros de resfriamento, tais como temperatura e pressão do ar, termômetros e manômetros podem ser incorporados ao sistema. O anel de resfriamento pode ser equipado com uma ou duas saídas (lábios) para o ar de resfriamento. Um anel de resfriamento com duas saídas é apresentado na figura 4.2.

Uma das condições importantes na construção do anel de ar é que a saída de ar esteja num ângulo de 45 e 60° da horizontal, para que o ar toque a superfície do filme, de maneira que não o corte e ajude a estabilizá-lo. A abertura do anel (saída) deve estar, normalmente, a 10 - 20 milímetros da distância da borda da matriz e deve ser regulável [10]. Segundo os princípios de escoamento de fluidos, uma abertura pequena resultará em altas velocidades do ar e ótimas taxas de resfriamento; ao contrário, uma abertura grande resultará em baixas velocidades do ar e baixa taxa de resfriamento. De uma forma geral, um sistema de resfriamento é classificado por três critérios [10]:

- **Capacidade de resfriamento** - volume de ar gerado por intervalo de tempo;
- **Capacidade de estabilização do balão** - distribuição uniforme do ar ao redor do balão;
- **Uniformidade da vazão de ar** - velocidades constantes do ar de resfriamento.

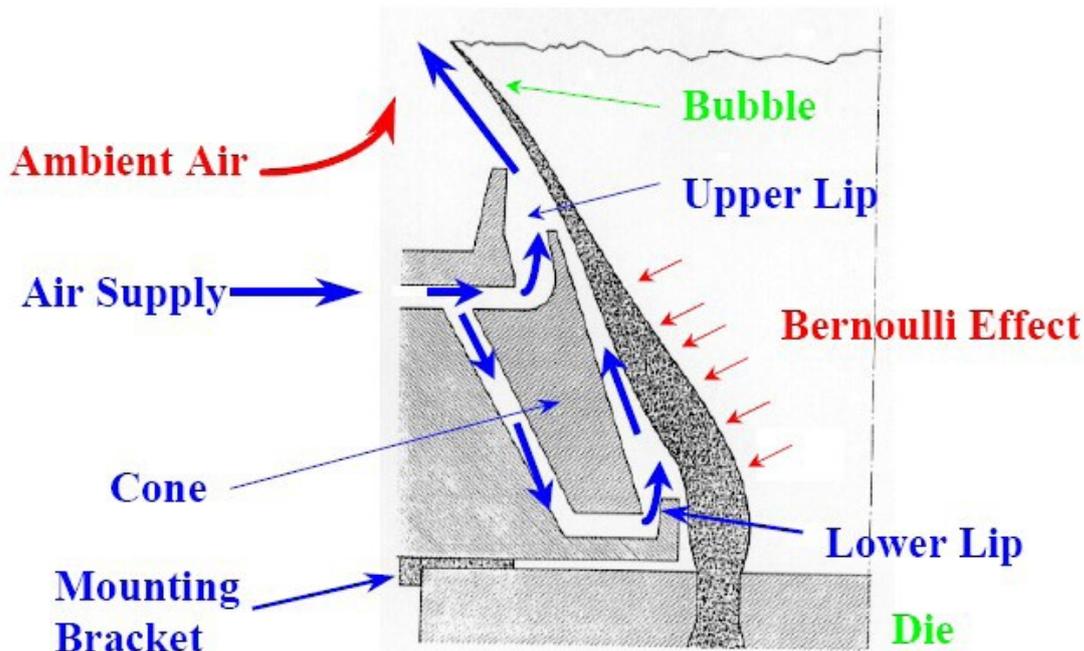


Figura 4.2 - Anel de resfriamento com duas entradas de ar: entrada superior (*upper lip*) e entrada inferior (*lower lip*).

A utilização de um resfriamento interno do balão (IBC - *internal bubble cooling*) apresenta nítidas vantagens sobre o sistema convencional, sendo o principal o aumento das taxas de produção (produtividade). O ar ocluído dentro do balão, se não for trocado, pode aquecer durante o processamento, resultando em um aumento na temperatura do filme. Um exemplo esquemático do sistema de resfriamento interno do balão é apresentado na figura 4.3. Assim, se o filme estiver com uma temperatura alta ao passar pelos rolos puxadores, temperatura esta que permita que o polímero ainda possa sofrer uma deformação

permanente, pode ocorrer o chamado **bloqueio** - ao ser achatado, as duas faces do filme grudam, resultando em problemas com a qualidade e a produtividade. Este tipo de resfriamento apresenta as seguintes características:

- Introdução de ar para resfriamento interno do balão;
- Extração de ar quente interno ao balão;
- Sensores de alta sensibilidade que regulam o fluxo volumétrico de ar, assegurando um diâmetro constante ao longo do tempo.

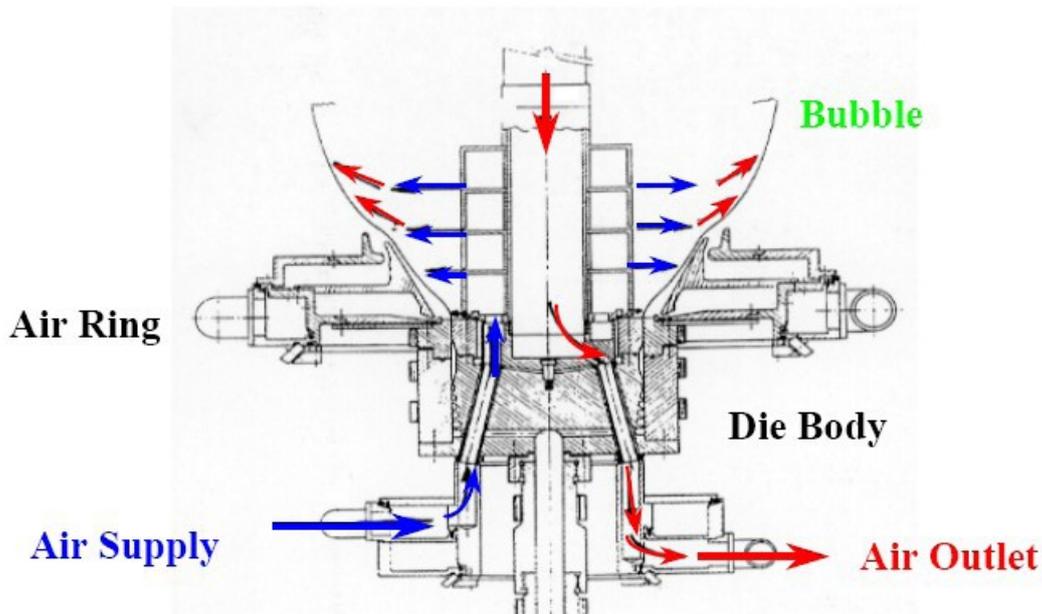


Figura 4.3 - Sistema de resfriamento interno do balão - *Internal Bubble Cooling*, demonstrando a entrada do ar de resfriamento pela lateral e a retirada do ar aquecido pelo centro da matriz.

4.2.2 Torre

A torre é um elemento de fundamental importância no processo de fabricação de filmes tubulares pois está relacionada diretamente à fatores que afetam a qualidade do produto. Na torre são montados diversos equipamentos fundamentais ao processamento de filmes tubulares, como os rolos puxadores, saia (responsável pelo gradual achatamento do balão), e os estabilizadores, juntamente com outros equipamentos secundários.

A altura da torre deve ser ajustável, e esta altura é determinada em função das características de processamento e da matéria-prima. A altura da torre deve ser ajustada para que o filme seja achatado a uma temperatura específica; temperatura alta o suficiente para não provocar dobras e vincos e baixa o suficiente para não provocar o bloqueio ao passar pelos rolos puxadores. Torres muito altas tendem a formar dobras na direção da extrusão, enquanto que torres muito baixas tendem a provocar dobras transversais.

4.2.3 Estabilizadores do balão

Independentemente de um anel de resfriamento adequadamente projetado, uma estabilização adicional do filme tubular entre a linha de névoa (ponto onde o diâmetro do balão torna-se constante) e os rolos puxadores é essencial para evitar a formação de dobras no filme.

Um equipamento bastante comum em linhas de extrusão é o diafragma tipo íris, colocado logo acima da linha de névoa, com abertura regulável para tocar toda a circunferência do filme - em relação à especificação de filmes, normalmente especifica-se

a largura da bobina, que possui uma relação com o diâmetro do balão, conforme mostrado abaixo:

$$\text{Diâmetro do balão} = DB = (2 \times \text{largura do filme}) / \pi \quad \text{eq. 4.1}$$

Adicionalmente, pode ser instalado na torre um cesto de calibragem, que consiste em uma série de anéis paralelos com pequenos roletes que tocam o balão, acima da linha de névoa. Também, é de uso crescente os estabilizadores internos do balão (*IBS - Internal Bubble Stabilisers*), que permitem a obtenção de um balão com excelente estabilidade, maior produção devido à velocidades de ar de resfriamento maiores, melhoria nas tolerâncias de espessura e planicidade do filme.

4.2.4 Saia

Para assegurar que o filme alcance os rolos puxadores sem nenhuma dobra ou vinco, ele deve ser achatado ainda quente (60 - 80°C) e relativamente flexível. Para isto, a torre é dotada de um sistema de achatamento gradual do filme. Para filmes de PEBD, a saia consiste de duas séries de roletes metálicos horizontais, dispostos de forma cônica, em contato com o filme. Por causa da eletricidade estática, em máquinas para filmes de PEAD é mais aconselhável o uso de sarrafos do que roletes. A abertura entre os sarrafos (ou os roletes) permite o resfriamento lento com ar ambiente, e há também a possibilidade de inserir sarrafos, em ângulo com a saia, para auxiliar a estabilização do balão [10]. Como há pouco risco dos filmes de PEAD aderirem-se (provocar o bloqueio), a saia e os suportes laterais podem iniciar o achatamento do balão logo após o diafragma tipo íris.

No achatamento do filme tubular, devido à geometria do sistema, as partes do balão em contato com a saia podem ter distâncias diferentes das partes que correm livres para chegar até os rolos puxadores. Com isto, podem haver diferentes velocidades nos diversos pontos do filme. Para minimizar esta diferença de comprimento e o risco de formação de rugas no filme, é indicado um ângulo de 20° para cada abertura da saia. Se o ângulo for maior do que 20°, ou seja, se a saia estiver muito aberta, ocorrem dobras transversais. Para ângulos menores, as dobras tendem à aparecer no sentido de extrusão do filme.

A razão de sopro (diâmetro do balão dividido pelo diâmetro da matriz) também influencia a estabilidade do balão. De uma maneira não muito acentuada, a diminuição da razão de sopro implica no aumento da estabilidade do balão, tornando-o mais firme e dimensionalmente estável. Esta característica de estabilidade deve ser observada quando se quer produzir filmes tubulares com altas taxas de extrusão.

4.2.5 Rolos puxadores

Também conhecidos por rolos de achatamento e arraste, servem para puxar o filme em direção aos cilindros de bobinagem, determinar a **espessura do filme por estiramento e evitar a saída de ar do interior do balão** [10]. Um dos rolos é de metal e outro de borracha para proporcionar uma boa prensagem - pressionar toda a superfície do filme que passa entre os rolos puxadores. É de fundamental importância que a linha de encosto entre os dois rolos esteja alinhada com o centro da matriz.

A velocidade dos rolos puxadores pode ser controlada pelo operador da máquina, pois é necessária a sua correta sincronia com a velocidade de extrusão, para que se mantenha a espessura requerida para o filme, além da possibilidade de modificação da mesma.

4.2.6 Bobinadeira

O desafio envolvido na operação de bobinamento consiste em se bobinar longas tiras de filmes contendo pequenas imperfeições, assegurando-se que estas imperfeições não fiquem em destaque e não se amplifiquem durante o processamento [11]. Assim, a bobinadeira é um equipamento isolado da extrusora e da torre, porém fundamental para o processo, pois o filme já processado e resfriado é aqui temporariamente armazenado.

O bobinamento do filme só pode ser efetuado perfeitamente quando ele sai dos rolos puxadores isento de dobras. Quando sua temperatura diminui, o filme torna-se rígido, dificultando a eliminação de possíveis dobras que já possuía. De qualquer forma, é fundamental que os bobinadores estejam alinhados com a máquina, dispondo de controles de velocidade para fornecer uma tensão ideal para o bobinamento do filme.

A tensão no filme é o princípio dominante durante o seu bobinamento em termos de controle da dureza do rolo. Quanto maior for a tensão de tração, maior será o estiramento imposto ao filme antes do bobinamento, e mais duro ficará o rolo bobinado. Dados empíricos tem mostrado que uma tensão de tração igual à 0,5% do módulo elástico do polímero pode ser aplicada sem que induza tensões permanentes significativas [11].

A utilização de rolos banana (rolos curvos) diminuem a possibilidade de formação de dobras no filme, pois permitem que o mesmo tenha velocidades diferenciadas em sua largura, mantendo uma tensão de tração mais uniforme. Alguns bobinadores possuem facas que cortam o filme duplo, permitindo o bobinamento em separado de dois filmes simples. Também é possível o corte de apenas um dos lados do filme, resultando no bobinamento de um filme simples de largura igual à circunferência do balão.

Uma bobina de filme com qualidade possui os seguintes atributos [11]:

- Formato correto: redondo e com largura adequada;
- Tamanho certo: diâmetro e comprimento adequados;
- Consistência certa: densidade de rolo adequada;
- Boa aparência: sem riscos ou defeitos visuais.

Assim, a tarefa do operador de bobinadeira (ou extrusora) não é camuflar a má qualidade do filme em rolos prontos para a entrega. Sua responsabilidade consiste, na verdade, em manipular filmes com ligeiras imperfeições e produzir rolos de qualidade que serão processados sem problemas nas linhas de produção dos clientes, gerando produtos de alta qualidade para os usuários subseqüentes da cadeia produtiva.

4.3 Variáveis do processo de extrusão de filmes tubulares

A geometria do balão no processo de produção de filmes tubulares é definida por características mensuráveis: a altura da linha de névoa em relação à matriz, espessura do filme produzido e diâmetro do balão, entre outros fatores, conforme mostrado na figura 4.4. Nos parágrafos abaixo, cada uma destas características mensuráveis serão discutidas em maiores detalhes.

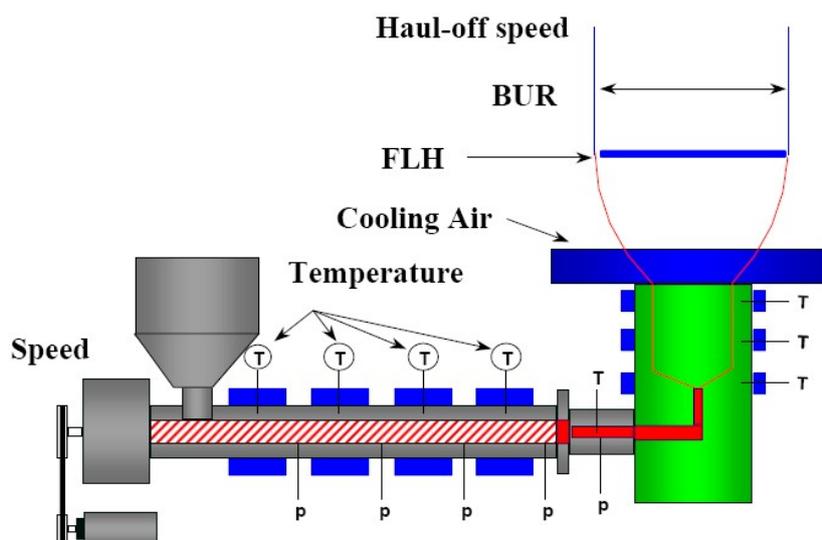


Figura 4.4 - Algumas variáveis de processo e de máquina do processo de extrusão de filmes tubulares; FLH - altura da linha de névoa; BUR - Razão deopro.

4.3.1 Temperatura da massa fundida (temperatura de extrusão)

Para a plastificação do polietileno, tanto de baixa quanto de alta densidade, há necessidade de fornecimento de energia na forma de calor. Essa energia calorífica, em sua grande maioria, é resultado da transformação de energia mecânica (rotação da rosca) em energia térmica.

Em termos de processo, é importante ter cuidado com a temperatura do polímero para evitar o bloqueio do filme ao passar pelos rolos puxadores. Também, o aumento da temperatura do polímero provoca uma diminuição da sustentabilidade do filme, pois a região não solidificada, em função da alta temperatura e redução da viscosidade, perde sua rigidez.

Ao contrário da estabilidade do filme, o aumento da temperatura da massa polimérica provoca um aumento na resistência ao impacto, uma vez que assim há mais tempo para que o polímero seja estirado e tenha uma orientação molecular balanceada.

4.3.2 Altura do pescoço

A distância entre a superfície da matriz e o ponto de início da expansão do balão denomina-se altura do pescoço (AP), e esta dimensão é de fundamental importância para a obtenção de filmes com boas propriedades mecânicas.

Observe a figura 4.5. analisando-se a zona 1, pode-se perceber que ao sair pela matriz, o filme extrudado perde calor, mantendo ou diminuindo o diâmetro do pescoço. Nesta zona do filme tubular ocorre o estiramento longitudinal do pescoço no sentido da máquina, não ocorrendo uma orientação molecular pronunciada, visto que nesta região as moléculas ainda possuem uma mobilidade suficiente para recuperarem as deformações submetidas.

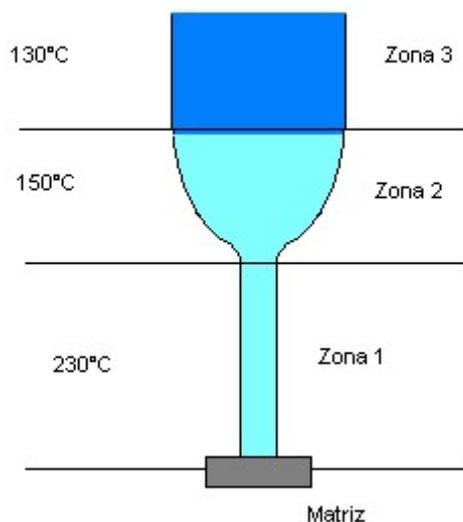


Figura 4.5 - Diferentes regiões do balão extrudado, correspondendo à diferentes faixas de temperatura e geometrias do filme.

O aumento do diâmetro do balão ocorre somente na zona 2, onde a temperatura é reduzida, mas ainda suficiente para permitir a movimentação das moléculas poliméricas. Como a temperatura está alta o suficiente para permitir o estiramento mas não a recuperação da deformação, é nesta região que ocorre a orientação molecular. O diâmetro final do balão é alcançado na zona 3, não havendo nenhuma modificação posterior. Após esta região, não ocorrem mais orientações moleculares devido a temperatura estar baixa, menor que a temperatura de solidificação do polímero - Ao limite entre as zonas 2 e 3 dá-se o nome de linha de cristalização, onde ocorre a passagem do estado amorfo para o estado semi-cristalino. Desta forma, pode-se concluir que a região de maior importância, devido à alta orientação molecular (tanto longitudinal quanto transversal) é a zona 2. A figura 4.5 mostra as variações na temperatura do filme com o aumento da distância em relação à matriz.

De uma forma prática, para se obter um balanceamento nas propriedades, conforme comentado anteriormente, a altura do pescoço deve estar entre 7 e 10 vezes o diâmetro da matriz. A figura 4.6 mostra a relação existente entre a altura do pescoço (AP) e a resistência à tração de filmes de PEAD.

4.3.3 Linha de névoa ou linha de resfriamento (*frost line*)

O polímero fundido emergente do lábio da matriz é soprado ainda no estado plastificado (fundido) e obtém a sua dimensão final (diâmetro do filme) na região da linha de névoa, onde ocorre a solidificação do polímero.

A linha de névoa, também chamada de linha de resfriamento (*frost line*), é uma região distinta do balão, que corresponde a passagem da massa polimérica do estado plastificado para o estado sólido. Pode ser definida como o ponto onde a temperatura do filme fica imediatamente abaixo da temperatura de cristalização do termoplástico. Neste ponto é onde ocorre a recristalização do termoplástico e, logicamente, acima deste ponto o diâmetro do balão torna-se constante. Normalmente, a linha de névoa situa-se de 30 a 60 centímetros acima da matriz, dependendo das condições operacionais da extrusora.

O controle da altura desta linha de névoa é essencial, pois exerce influência direta na orientação molecular, tanto na direção da extrusão, quanto na direção transversal. Por conseguinte, há influência nas propriedades físicas do filme produzido, tais como a resistência ao impacto, resistência à tração e resistência ao rasgo.

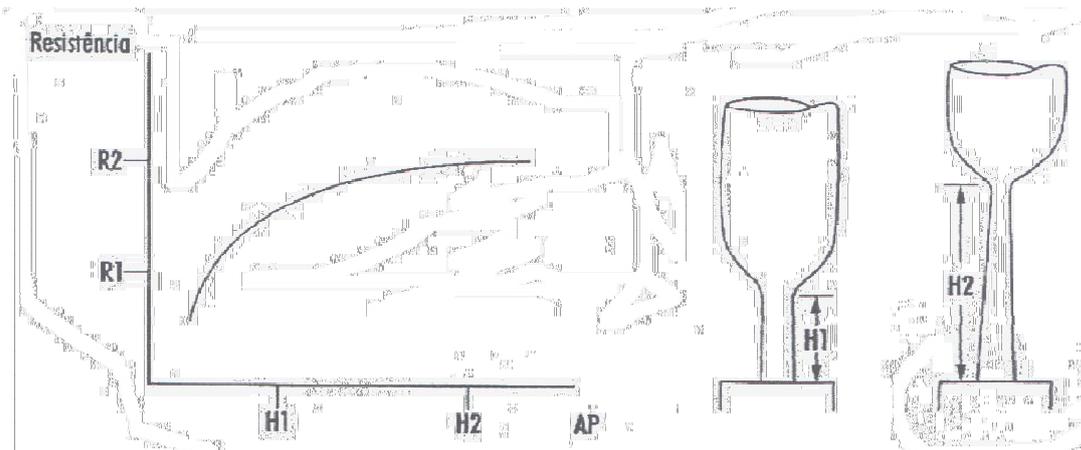


Figura 4.6 - Relação existente entre resistência à tração e a altura do pescoço para filmes de PEAD.

Ajustes necessários para posicionar a altura da linha de névoa são feitos através de alterações na velocidade de rotação da rosca (que influencia também a velocidade de extrusão), fazendo-se também o ajuste correspondente na velocidade de puxamento (estiramento longitudinal) do filme. Estes ajustes devem ser realizados no início do processamento para que a espessura requerida do filme seja alcançada o mais rápido possível, evitando a produção de material fora de especificação. Já os ajustes de menor sensibilidade, recomenda-se que sejam realizados por meio de variação da vazão de ar de resfriamento no interior do balão, ou por meio da abertura do anel calibrador.

A linha de névoa apresenta alta sensibilidade de variação quanto à espessura ao longo do perímetro do filme. Se a espessura variar de um lado em relação ao outro, a linha de névoa também apresentará variações acentuadas em sua altura, fazendo com que o filme tenha regiões de diferentes orientações moleculares, prejudicando, então, suas propriedades finais. Portanto, a linha de névoa deve sempre apresentar-se perfeitamente horizontal ao redor do balão para que haja uniformidade no filme, conforme apresentado na figura 4.7.

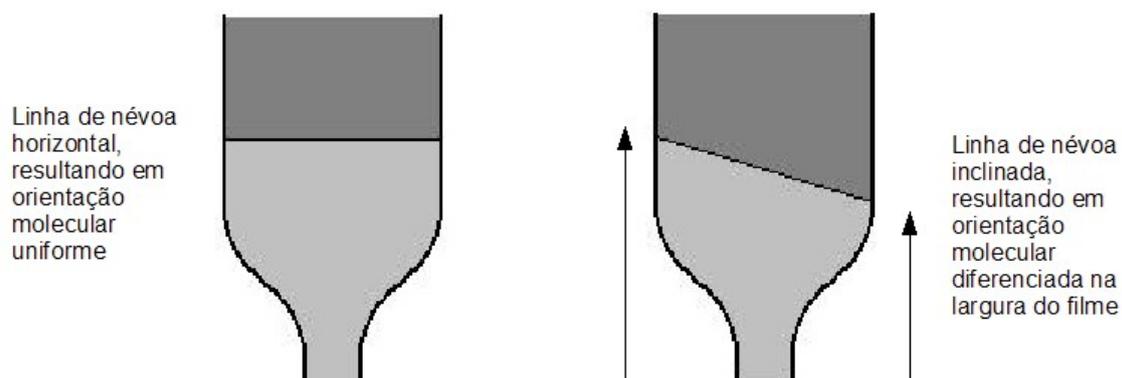


Figura 4.7 - Linha de névoa horizontal (orientação molecular uniforme) e linha de névoa inclinada (variação na orientação molecular e espessura final do filme).

As influências da modificação da altura da linha de névoa comentadas abaixo se referem à hipótese de que todas as demais variáveis do processo sejam mantidas constantes:

- Durante o processamento de filmes tubulares, a elevação da linha de névoa (aumento da distância em relação à matriz) relaciona-se a um maior tempo de solidificação da massa fundida, fazendo com que a superfície do filme torne-se mais polida, com melhor brilho e

maior transparência. Portanto, as propriedades ópticas são favorecidas com esta condição. Como desvantagem poderá ocorrer o bloqueio do filme após o seu achatamento pelos rolos puxadores;

- A resistência ao impacto do filme extrudado é inversamente proporcional a altura da linha de névoa. Quanto maior esta altura, menor a resistência ao impacto do material, pois ela favorece o prevalecimento da orientação molecular no sentido da extrusão. Assim, deve-se sempre buscar um equilíbrio entre as propriedades ópticas e de resistência ao impacto do filme. Também, uma altura muito grande da linha de névoa resulta em dificuldades na estabilização do balão, o que é extremamente prejudicial à qualquer controle de processo.

A figura 4.8 mostra a relação existente entre a temperatura e a velocidade do filme a medida em que aumenta a distância da matriz. Pode-se observar que, como um resultado da diferença entre as velocidades de saída do polímero pela matriz e dos rolos puxadores (estiramento longitudinal), a velocidade do filme aumenta exponencialmente até atingir a linha de névoa, mantendo-se constante a partir deste momento (velocidade dos rolos puxadores), em função da não existência de estiramento do filme e orientação molecular após esta região.

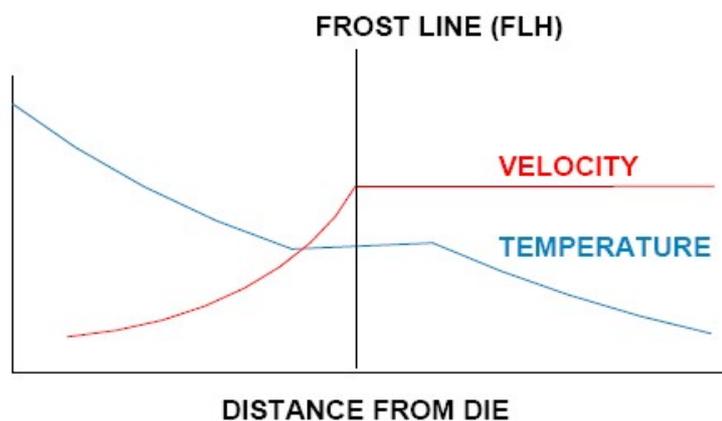


Figura 4.8 - Relação entre temperatura e velocidade de estiramento longitudinal de filmes tubulares.

Um efeito contrário pode ser observado com a temperatura do filme, que diminui após a saída da matriz até alcançar a linha de cristalização, permanecendo constante até alcançar a linha de névoa. Este patamar de temperatura constante do filme é resultado do processo de solidificação do polímero sob temperatura constante (mesmo efeito que ocorre durante a fusão). Após a passagem pela linha de névoa, a temperatura do filme continua a diminuir (resfriar), em função do resfriamento complementar.

4.3.4 Razão de sopro (RS), razão de estiramento longitudinal (RE) e razão de conformação (RC)

A **razão de sopro** é definida como sendo a razão entre o diâmetro do balão (D) e o diâmetro da matriz (d). Porém, esse valor é apenas indicativo, pois a relação de sopro real é a existente entre o diâmetro do balão (D) e o diâmetro do pescoço imediatamente antes da expansão radial do filme (d'). Assim, podemos escrever a razão de sopro como sendo:

$$RS = D/d \text{ ou } RS = D/d' \tag{eq. 4.2}$$

De uma forma geral, a razão de sopro utilizada para filmes de PEAD situa-se entre 3,5:1 e 5,5:1, e para PEBD situa-se entre 1,5 e 2,5, limites dentro dos quais são obtidos filmes com bom balanceamento do estiramento molecular nos dois sentidos.

A **razão de estiramento longitudinal (RE)** é a razão entre as velocidades dos rolos puxadores e de escoamento do polímero ao sair da matriz. Esta razão define o estiramento do filme no sentido da máquina, e pode ser escrita como:

$$RE = \text{Velocidade dos rolos puxadores} / \text{velocidade do polímero na matriz} \quad \text{eq. 4.3}$$

Um terceiro parâmetro, que quantifica a relação proporcional entre os estiramentos transversal e longitudinal, é a **razão de conformação**:

$$RC = RS/RE \quad \text{eq. 4.4}$$

Para a razão de conformação, se o valor calculado for igual a 1, significa que há um balanceamento perfeito entre os estiramentos longitudinal e transversal; se o valor for maior do que a unidade, significa que o filme está sendo estirado mais no sentido transversal do que no longitudinal; se o valor for menor do que a unidade, indica que o filme está sendo mais estirado no sentido longitudinal do que no transversal.

4.3.5 Orientação molecular

Durante o processamento, as macromoléculas dos termoplásticos amorfos ou semicristalinos tendem a ser orientadas preferencialmente na direção em que sofrem algum esforço. Com a solidificação do extrudado, a orientação molecular se mantém, embora haja um certo grau de relaxação molecular. Na direção da orientação preferencial, o produto apresenta uma maior resistência à tração. Em contrapartida, na direção transversal a resistência à tração é muito inferior. Além disto, a resistência ao impacto também fica muito baixa.

Assim, para muitos produtos, o processo não deve causar excessiva orientação numa única direção. Por exemplo, para que um filme extrudado tenha boa resistência ao impacto é fundamental que além da orientação na direção longitudinal haja igual orientação na direção transversal. Esta situação é chamada de **bi-orientação molecular**.

Os polietilenos, principalmente os de alta densidade, tendem a ter suas macromoléculas fortemente orientadas na direção da extrusão e estiramento. Logo, um filme de PEAD extrudado pelo processo plano não possuiria boa resistência ao impacto. Pelo processo tubular é possível bi-orientar o filme, através do estiramento transversal à direção de extrusão, provocado pelo insuflamento do balão.

4.3.6 Espessura do filme

O filme emergente da matriz tem, geralmente, espessura variando de 0,5 a 2 mm, a depender do porte da matriz, e será submetido imediatamente à forças alongacionais advindas dos rolos puxadores e do ar soprado internamente, que promoverá a formação do balão.

É importante ressaltar que os parafusos de ajustes da abertura da matriz servem para ajustar a uniformidade da espessura no perímetro do filme tubular extrudado, e não para regular o valor nominal da espessura final do produto. Faz sentido pensar que quanto maior a espessura do filme a ser produzido maior deve ser a abertura da matriz, mas como existe o estiramento do filme provocado pela insuflação de ar no seu interior e pelos rolos puxadores, é também claro que a espessura final será bem menor do que aquela com que o filme sai da matriz.

Para evitar variações de espessura ao longo do perímetro do filme, inclusive marcas provenientes do efeito gravitacional da formação do balão, todas as extrusoras modernas possuem um cabeçote giratório (rotacional), que gira contínua e lentamente. Com isso garante-se, ainda mais, a homogeneidade final do filme que está sendo extrudado e, embora a espessura nominal possa mudar, esta variação é, ao menos, distribuída pelo balão. Em extrusoras de grande porte, um sistema de rolos puxadores em conjunto com a saia é que giram lentamente, no topo da torre, sem provocar o enroscamento do filme que desce em direção à bobinadora, obviamente.

Em linhas gerais, a variação de espessura considerada satisfatória é de 5%. É importante um controle rígido da espessura e largura do filme, pois estas variáveis influem diretamente nas propriedades mecânicas e ópticas do produto final.

4.3.7 Resfriamento do filme tubular

Toda a energia térmica introduzida ao termoplástico por meios mecânicos (rotação da rosca) e elétricos (resistências elétricas) é extraída do polímero por resfriamento direto. Normalmente, a taxa de vazão (extrusão) determina todos os requerimentos de transferência de calor; as dimensões da zona de resfriamento e os espaços necessários para as instalações são determinadas em função deste requisito. Para filmes tubulares (e produtos com pequenas espessuras), o método mais utilizado de resfriamento é a convecção forçada - ar forçado sobre o produto. Normalmente, os coeficientes de transferência de calor por convecção ficam em torno de 5 a 30 W/m²K, variando em função da velocidade e da temperatura do fluido de resfriamento [6].

Uma das considerações importantes no projeto de sistemas de resfriamento em máquinas extrusoras é reduzir ao máximo o gradiente de temperatura através da espessura de parede do produto (variação de temperatura ao longo de uma dimensão) - este problema tende a ocorrer em produtos com maior espessura de parede. Para filmes, cuja espessura é extremamente baixa em comparação com tubos, chapas e perfis, este problema de gradiente de temperatura virtualmente não existe.

A figura 4.9 mostra as linhas de fluxo de ar ao redor de um filme de PEBDL. Os dois modelos de fluxo de ar apresentados na mesma figura (lado direito e lado esquerdo) corresponde a diferentes velocidades de ar reguladas no anel de resfriamento com duas aberturas. O lado esquerdo apresenta um modelo de escoamento de baixa velocidade do ar, enquanto que o lado direito apresenta o modelo de escoamento de alta velocidade do ar de resfriamento. Apesar da aparente similaridade entre os dois modelos de fluxo, há diferenças significativas onde o ar emerge dos lábios superiores do anel de resfriamento. O modelo de baixa velocidade do ar (lado esquerdo) indica que a maior quantidade do ar é direcionada para o maior orifício. Na saída deste orifício percebe-se um efeito *Coanda*, criando assim um vórtex de re-circulação. O modelo de alta velocidade do ar (lado direito) exibe uma maior distribuição do ar pelo orifício menor. Enquanto o maior volume de ar está viajando através do maior orifício, o balanço entre os dois fluxos é alterado e o efeito *Coanda* (vórtex) não é observado neste regime de fluxo [13].

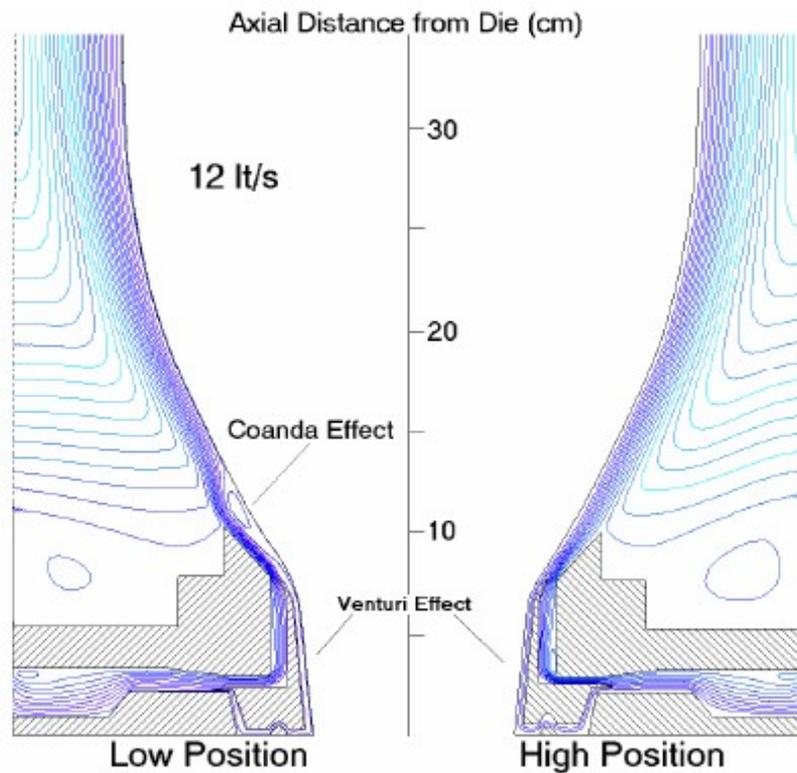


Figura 4.9 - sistema de resfriamento mostrando diferentes perfis de velocidades de escoamento do ar de resfriamento.

A figura 4.10 exibe a diferença nos perfis de temperatura do filme para os dois modelos de fluxo de ar de resfriamento (baixa e alta velocidade), em função da distância em relação à matriz. Nestas figuras, pode-se observar as temperaturas da superfície interna e externa do filme, bem como a temperatura média do filme. Pode-se observar que para o resfriamento com maior fluxo de ar, como é de se esperar, que a temperatura da superfície externa do filme, próximo à saída da matriz (5 a 10 cm), é menor em relação ao outro método de resfriamento, e que, a medida em que o filme se afasta da matriz, as temperaturas das superfícies internas e externas tendem a se igualarem [13]. Este efeito pode ser melhor visualizado na figura 4.11, a qual exibe a temperatura média do filme em relação à distância da matriz, para os dois modelos de fluxo do ar de resfriamento.

De uma forma geral, mantendo-se as demais variáveis de processo e de máquina constantes, um aumento na taxa de resfriamento (retirada de calor do filme por unidade de tempo) resulta em uma diminuição da linha de névoa e da altura do pescoço, resultando em um menor grau de estiramento do polímero em função da rápida restrição do escoamento (deslizamento) das moléculas poliméricas quando estas são submetidas às tensões de estiramento longitudinal e transversal.

4.3.8 Tensões de tração impostas ao filme

Um dos parâmetros mais críticos que afetam as propriedades do filme são as tensões de tração impostas nas direções longitudinal e transversal do material que está sendo extrudado. Enquanto que as tensões de cisalhamento originadas durante a passagem do polímero pela matriz estão sendo aliviadas após a saída do material pela matriz, tensões elongacionais bi-axiais são agora desenvolvidas [12].

Para polímeros semi-cristalinos, o processo de re-cristalização ocorre abaixo da linha de névoa, e a tensão biaxial imposta na região da linha de névoa exerce uma enorme influência na formação da morfologia do filme. Estas tensões de tração nas direções

longitudinal e transversal de filmes tubulares são calculadas em função de medidas de tensão e da pressão interna do balão utilizando-se as seguintes expressões:

$$S_{mf} = Fz (2\pi ah)^{-1} \xi^{-1} TUR \quad \text{eq. 4.5}$$

$$S_{tf} = a(h)^{-1} \xi^{-1} \Delta p (BUR)^2 TUR \quad \text{eq. 4.6}$$

Nestas equações, temos que:

S_{mf} - Tração na direção da máquina na linha de névoa

S_{tf} - Tração na direção transversal na linha de névoa

Fz - Força de tração na região da linha de névoa

a - raio da matriz

h - abertura da matriz

ξ - taxa máxima de estiramento

TUR - Razão de estiramento longitudinal

Δp - Pressão interna ao balão

BUR - Razão de sopro

Pode ser notado que as tensões de tração longitudinal e transversal não são apenas funções das razões de sopro e de estiramento longitudinal, mas também do diâmetro e da abertura da matriz. Desta forma, identificar amostras de filmes apenas com a razão de estiramento longitudinal e razão de sopro não é suficiente; é necessário especificar outras variáveis também, tais como diâmetro e abertura da matriz, taxa de extrusão e temperatura da massa fundida [12].

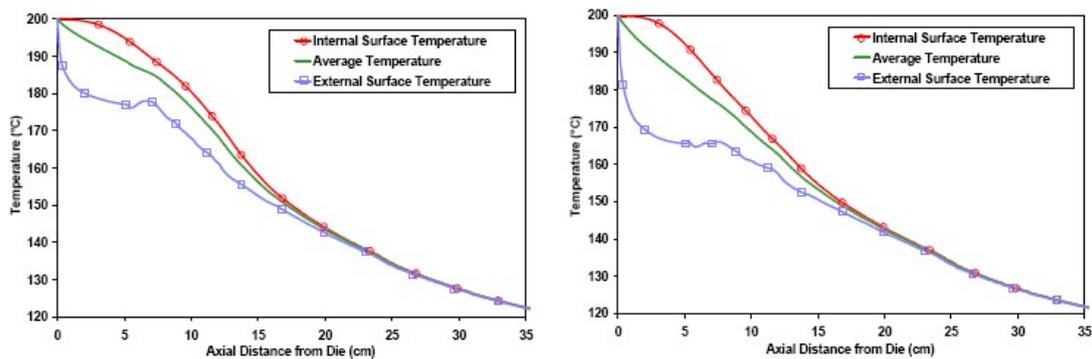


Figura 4.10 - variação da temperatura do filme (superfície) em relação à distância da matriz, para dois modos de resfriamento (alta taxa de resfriamento e baixa taxa de resfriamento).

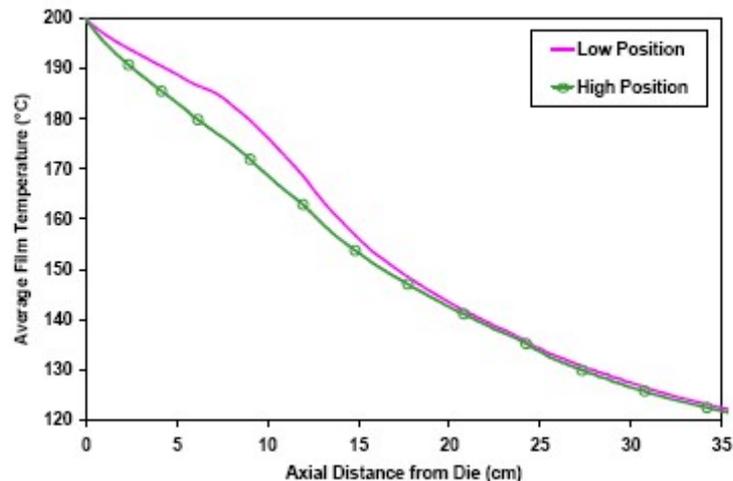


Figura 4.11 - perfil geral (genérico) de resfriamento do filme tubular em função do aumento da distância em relação à matriz.

4.3.9 Relacionamento entre variáveis de processo, matérias-primas e propriedades dos filmes

A medida em que a velocidade de rotação da rosca aumenta, aumenta também a taxa de cisalhamento (deformação por unidade de tempo), o que resulta em um aumento na temperatura da massa fundida que emerge pela matriz. Também, com o aumento da velocidade de rotação da rosca, aumenta a taxa de extrusão, o que contribui para um aumento da espessura do filme, desde que a velocidade dos rolos puxadores seja mantida constante. Como o filme está mais quente e apresenta maior espessura, isto representa uma maior massa térmica, ocorrendo um atraso na solidificação e conseqüente aumento na linha de cristalização e linha de névoa, desde que as condições de resfriamento sejam mantidas constantes. Assim, como conseqüência do aumento da velocidade da rosca e do efeito dos demais fatores, o diâmetro do tubo tende a aumentar, aumentando portanto, a largura do filme. Isto ocorre pois como a altura da linha de névoa é aumentada ocorre um alongamento do pescoço, e o volume de ar dentro do balão, por ser constante, provoca um aumento no diâmetro do mesmo.

Um aumento na taxa de resfriamento, seja em função do aumento da velocidade do ar ou pela redução da temperatura do ar de resfriamento, provoca uma diminuição da altura da linha de névoa. Como o volume de ar dentro do balão é constante, e a diminuição da altura da linha de névoa provoca uma diminuição da altura do pescoço e conseqüentemente redução do diâmetro do balão. Como resultado da redução do diâmetro do balão, ocorre um menor grau de estiramento transversal do filme, resultando em aumento em sua espessura.

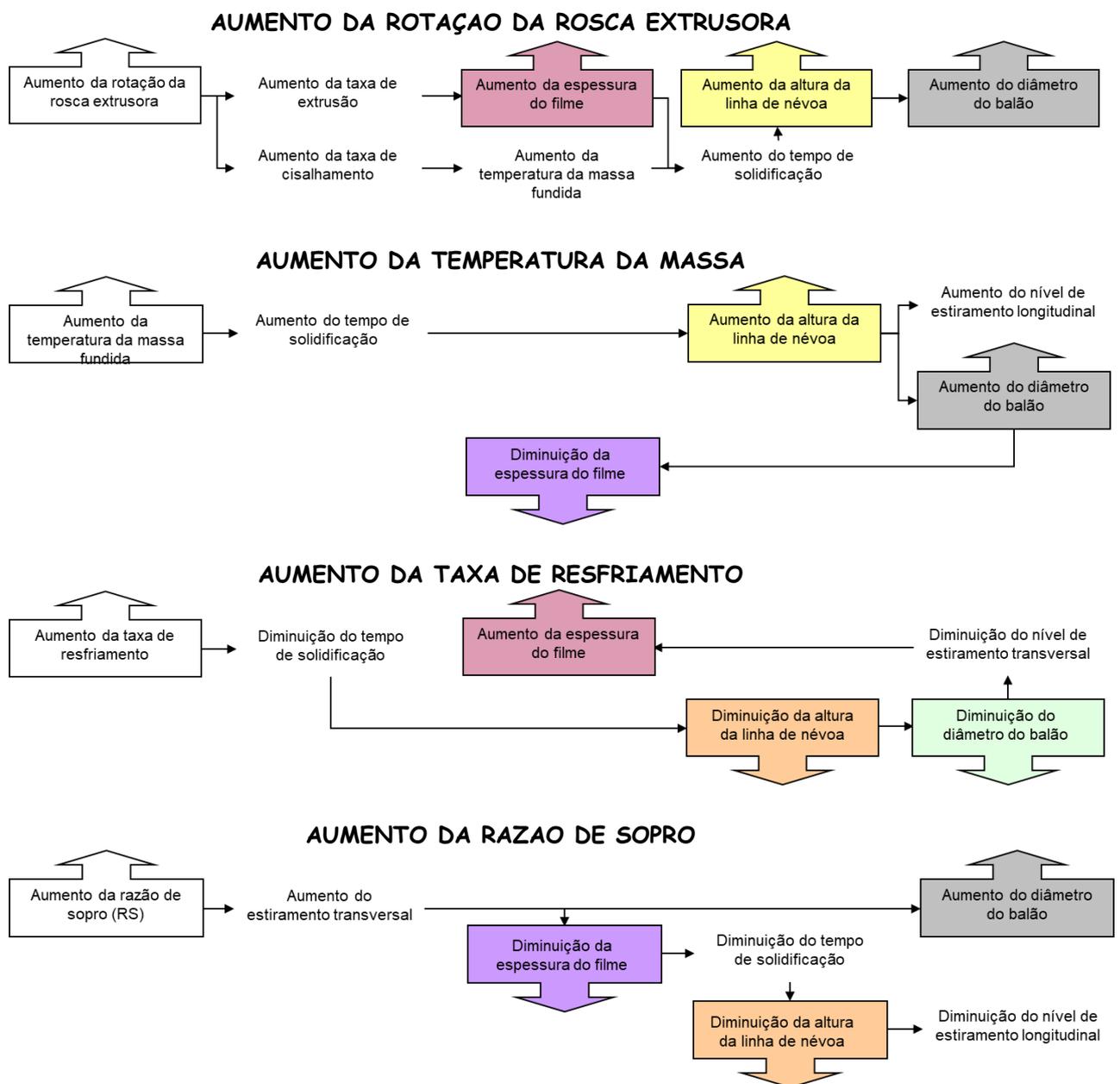
O aumento do volume interno do balão primeiramente faz com que ocorra um maior estiramento na direção transversal, provocando um aumento em seu diâmetro e a produção de um filme mais fino [14]. Como o filme fica mais fino, ocorre uma diminuição da massa térmica, ou seja, o material resfria mais rapidamente, diminuindo a altura da linha de névoa e linha de cristalização, reduzindo o nível de estiramento longitudinal do filme.

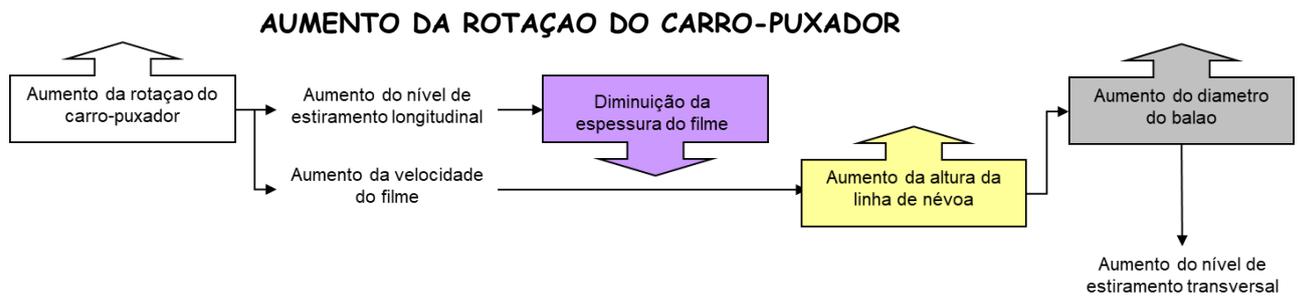
Aumentando-se a velocidade de rotação dos rolos puxadores e mantendo-se constante a taxa de extrusão (velocidade da rosca), ocorre um maior nível de estiramento longitudinal do filme, tornando-o mais fino. Também, com o aumento da velocidade de rotação dos rolos puxadores, ocorre um aumento na velocidade do filme, de forma que a altura da linha de névoa é aumentada juntamente com a altura do pescoço. Uma vez que o volume de ar dentro do balão é fixo e a altura do pescoço é aumentada, o diâmetro do balão tende a aumentar, aumentando-se também o estiramento na seção transversal do filme [15].

A tabela 4.1 resume a relação existente entre as quatro variáveis de processo e três parâmetros da geometria do filme tubular [14].

Parâmetro do Processo	Espessura do filme	Diâmetro do balão	Altura da linha de névoa
Aumento da temperatura da massa polimérica	↓	↑	↑
Aumento da taxa de resfriamento	↑	↓	↓
Aumento da razão de sopro	↓	↑	↓
Aumento da razão de estiramento longitudinal	↓	↑	↑

Tabela 4.1 - relação entre variáveis de processo e parâmetros geométricos de filmes tubulares.





REFERÊNCIAS

- [1] KRAMER, W.. *Motors and drivers for extrusion applications*. SPE ANTEC, 1999.
- [2] RAUWENDAAL, C.. *Polymer extrusion*. Munich: Hanser Gardner, 2001.
- [3] RAUWENDAAL, C.. *Statistical process control in extrusion*. New York: Hanser, 1993.
- [4] THOMSOM, F. M.. *Particulate polymer handling and storage engineering*. In M. Narkins e N. Rosenzweig. *Polymer powder technology*. New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [5] STEVENS, M. J., COVAS, J.. *Extruder principles and operations*. New York: Chapman & Hall, 1995.
- [6] BIRLEY, W., HAWORTH, B., BATCHELOR, J.. *Physics of Plastics: Processing, Properties and Materials Engineering*. Hanser: New York, 1993.
- [7] STEWARD, Edward L.. *recording pressure and melt temperature in extrusion*. SPE ANTEC, 1998.
- [8] CATÁLOGO SEGURANÇA EM EXTRUSORAS (sem fonte precisa)
- [9] Notas de aula de processos de transformação do curso Técnico em Transformação de Termoplásticos, ano 2000, Professor Andrei Z. Cavalheiro, CEFET/RS - UNED Sapucaia do Sul.
- [10] POLÍGRAFO DE PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO, 2000 - Disponível na Biblioteca do Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas / Uned Sapucaia do Sul..
- [11] SMITH, R. D.. *Como melhorar o desempenho de bobinadoras de filmes*. SPE ANTEC 2002; Revista Plástico Industrial, 2003.
- [12] KWACK, T. H.. *Processing variables and the scaling parameters in blownfilm extrusion*. SPE ANTEC, 1999.
- [13] SIDIROPOULOS, V., VLACHOPOULOS, J.. *Numerical simulation of blow film cooling*. SPE ANTEC 2001.
- [14] CANTOR, K. *Como as variáveis de processo determinam a geometria dos filmes tubulares*. SPE ANTEC 2000; Revista Plástico Industrial, 2001.
- [15] PROGELHOF, R. C., THRONE, J. L.. *Polymer engineering principles: properties, process, test for design*. Hanser: New York, 1993.
- [16] CHARRIER, J. M.. *Polymer materials and processing: plastics, elastomers and composites*. Hanser: New York, 1990.