



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA TECNOLÓGICA**

**EXTRUSÃO DE FILMES DE POLIETILENO DE
BAIXA DENSIDADE POR SOPRO**

Vitor de Pádua Santos

**Belo Horizonte - MG
2015**



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA TECNOLÓGICA**

**EXTRUSÃO DE FILMES DE POLIETILENO DE
BAIXA DENSIDADE POR SOPRO**

Vitor de Pádua Santos

Monografia apresentada ao Curso de Química Tecnológica do CEFET-MG como parte das exigências da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II).

Orientador: Prof^a. Dra. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício e Prof. Dr. Roberto de Souza Freitas

Banca Examinadora:

**Prof^a. Dr^a. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício
(orientadora)**

Prof. Dr. Roberto Fernando de Souza Freitas (co-orientador)

Prof. Dr. Patterson Patrício

Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado

**Belo Horizonte - MG
2015**

AGRADECIMENTOS

- À Prof^a. Dr^a. Patrícia Santiago de Oliveira Patrício, por todo apoio e suporte durante todo tempo no CEEFT-MG. Apoio que inclui dois anos de orientação no projeto de iniciação científica, um ano de orientação neste Trabalho de Conclusão de Curso, além de diversas orientações profissionais;
- Ao Prof. Dr. Roberto de Fernando de Souza Freitas, pela co-orientação neste Trabalho de Conclusão de Curso;
- Aos Prof. Dr. Patterson Patrício e Claudinei Rezende Calado, por me orientarem profissionalmente e serem meus mentores durante toda a graduação no CEFET-MG. Além de aceitarem o convite para formarem minha banca de avaliação neste Trabalho de Conclusão de Curso;
- Aos professores do CEFET-MG por todo ensinamento;
- Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por toda estrutura e oportunidades;
- To California State University, Fullerton for all support and opportunities to study in United States of America;
- To Dr. Rogers who taught me Polymer Chemistry at California State University, Fullerton;
- Ao amigo e professor de Inglês, Arnaldo Dornelas, pelo auxílio nas traduções dos termos;
- Aos meus pais, Antônio e Liliane, por sempre valorizar e incentivar meus estudos, além de sempre confiar em meu potencial;
- À minha irmã, Raquel, por sempre me apoiar e incentivar;
- À minha namorada, Karina Mattos, por estar ao meu lado durante a graduação;
- Ao meu cunhado Guilherme Leão, por me apoiar e incentivar durante a graduação;
- Ao gerente de extrusão da Uniplast, Aderson Pinto Barbosa, por me ensinar muito sobre os materiais e processo de extrusão, além de fornecer materiais de grande importância nesta pesquisa;

- À Uniplast Indústria de Embalagens Ltda., pelo livre acesso a estrutura;
- Aos colegas de CEFET-MG por sempre estar ao meu lado durante todos os momentos difíceis da graduação e por compartilhar momentos inesquecíveis;
- Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma agregaram o meu conhecimento intelectual e pessoal.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIPLAST	Associação Brasileira do Plástico
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PEUAPM	Polietileno de Ultra Peso Molecular
PEUBD	Polietileno de Ultra Baixa Densidade
ASTM	American Society for Testing and Materials
<i>DC motor</i>	Motor corrente contínua
<i>AC motor</i>	Motor de corrente alternada
rpm	Rotações por minuto
RC	Razão de compressão da rosca
L	Comprimento da rosca
D	Diâmetro da rosca
H	Profundidade do canal
psi	Libra força por polegada quadrada (pound force per square inch)

LISTA DE FIGURAS E FLUXOGRAMAS

Figura 1 Estruturas representativas para os polímeros lineares e não lineares

Figura 2 Estrutura representativa de (a) homopolímero e (b) copolímero

Figura 3 Estrutura representativa do polietileno de baixa densidade

Figura 4 Principais componentes da extrusora monorosca

Figura 5 Sistema motor (a) direto; (b) indireto

Figura 6 Desenho esquemático da extrusora com alimentação por inundação

Figura 7 Desenho esquemático da extrusora com alimentação por funil de alimentação proporcional

Figura 8 Desenho esquemático da extrusora com alimentação por funil de alimentação induzida

Figura 9 Desenho esquemático da extrusora com alimentação fundida

Figura 10 Canais de resfriamento (*Cooling channels*) na extrusora

Figura 11 Desenho esquemático para o sistema de rosca, canhão e aquecedores de uma extrusora monorosca

Figura 12 Desenho esquemático da rosca de uma extrusora monorosca

Figura 13 Placa de ruptura e sua localização ao final da extrusora

Figura 14 Desenho esquemático de uma matriz para extrusão de filmes por sopro

Figura 15 Desenho esquemático da formação de uma ponte no funil de alimentação por inundação

Figura 16 Desenho esquemático da formação do afinilamento em um funil de alimentação

Figura 17 Desenho esquemático da formação do aprisionamento seletivo em um funil de alimentação

Figura 18 Desenho esquemático do deslizamento (*slippage*) causado por grandes partículas de matéria-prima, lubrificantes ou líquidos

Figura 19 Desenho esquemático do corte (*cutting*) causado por grandes partículas de matéria-prima

Figura 20 Desenho esquemático da ejeção (*ejection*) causado por grandes partículas de matéria-prima elástica

Figura 21 Desenho esquemático para o processo de fusão da extrusora

Figura 22 Desenho esquemático para o processo de fusão nas diferentes zonas da extrusora

Figura 23 Desenho esquemático do efeito da largura do leito sólido no processo de plastificação

Figura 24 Desenho esquemático do modelo de transmissão do polímero fundido

Figura 25 Desenho esquemático do modelo para o perfil de velocidade na zona de compressão da extrusora

Figura 26 Desenho esquemático de uma rosca com zona distributiva e (b) rosca com zona dispersiva

Figura 27 Desenho esquemático de uma extrusora com dois estágios de rosca

Figura 28 Desenho esquemático para uma matriz genérica

Figura 29 Desenho esquemático do processo de extrusão de filmes por sopro

Figura 30 Matriz circular com o cabeçote para o processo de extrusão de filmes por sopro

Figura 31 Desenho esquemático para os três tipos de matrizes da extrusão de filmes por sopro

Figura 32 Desenho esquemático para a matriz de alimentação inferior espiral para a extrusão de filmes por sopro

Figura 33 Desenho esquemático (a) para a matriz com resfriamento por anel de ar (b)

Figura 34 Desenho esquemático (a) para a matriz com resfriamento interno associado ao resfriamento externo por anel de ar (b)

Figura 35 Torre para o processo de extrusão de filmes por sopro

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 Classificação dos polietilenos de acordo com a norma ASTM D-1248-05

Tabela 2 Temperatura de processamento para o PEBD

RESUMO

EXTRUSÃO DE FILMES DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE POR SOPRO

SANTOS, V. P.

Palavras-chave: polietileno, extrusão, extrusora monorosca, extrusão de filme por sopro.

Neste trabalho foram estudadas as características e propriedades do polietileno de baixa densidade (PEBD) bem como o processo de extrusão de filmes de PEBD por sopro. Destaca-se que a extrusão representa a maioria dos processos produtivos utilizados na produção de transformados plásticos, e o PEBD foi responsável por 13% do mercado de resinas consumidas no Brasil, devido as características como leveza, fácil processamento e baixo custo que tornam o polietileno um excelente material para a indústria. O processo de extrusão é caracterizado por ser um processo contínuo no qual há a mistura de materiais que passam pelo estado viscoso durante o processo. A extrusora pode ser dividida em cinco componentes majoritários que são: sistema motor, sistema de alimentação, sistema de rosca, canhão e aquecedores, cabeçote e matriz, e por último sistema de controle. Dentre estes componentes majoritários, vale destacar a rosca que apresenta como funções: transportar, fundir ou amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. Além dessas funções a rosca é responsável por gerar, via cisalhamento, maioria da energia fornecida para a fusão do material no processo de extrusão. Outro componente majoritário que merece destaque é o conjunto formado pelo cabeçote e matriz, que é responsável por moldar o material fundido proveniente da extrusora produzindo as dimensões desejadas sob uma específica taxa de transferência. O processo de extrusão de filme por sopro é praticamente exclusivo de extrusoras monoroscas, e em sua maioria utilizam a matriz de alimentação helicoidal inferior. Neste processo, a matéria-prima fundida flui pelo cabeçote e por uma matriz circular para formar um balão que é puxado verticalmente para cima, na maioria dos casos. O resfriamento do polímero é realizado por anéis de ar que estão localizados na extremidade da matriz, existe ainda a possibilidade de um resfriamento interno para aumentar a taxa de resfriamento do

material, e assim aumentar a produtividade do processo. A torre para o processo de extrusão de filmes sustenta todos os componentes necessários para a formação do filme além de fornecer a distância necessária para o resfriamento e solidificação do filme.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	iii
LISTA DE FIGURAS E FLUXOGRAMAS	iv
LISTA DE TABELAS E QUADROS	vi
RESUMO	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. METODOLOGIA	2
3. DESENVOLVIMENTO	2
3.1. Polímeros	2
3.1.1. Polietileno	6
3.1.2. Tipos de polietileno	7
3.1.2.1. Polietileno de Baixa Densidade	7
3.2. Processo de extrusão	11
3.2.1. Equipamento	11
3.2.1.1. <i>Sistema motor</i>	12
3.2.1.2. <i>Sistema de alimentação</i>	14
3.2.1.3. <i>Sistema de rosca, canhão e aquecedores</i>	18
3.2.1.3.1. <i>Sistema de rosca</i>	19
3.2.1.3.2. <i>Canhão e aquecedores</i>	21
3.2.1.4. <i>Cabeçote e matriz</i>	21
3.2.1.5. <i>Sistema de controle</i>	24
3.3. Comportamento plástico na extrusora	25
3.3.1. <i>Zona de alimentação</i>	25
3.3.2. <i>Zona de fusão ou plastificação</i>	32
3.3.3. <i>Zona de transmissão da fusão</i>	35
3.3.4. <i>Zona de mistura</i>	38

3.3.5.	Zona de desvolatilização	39
3.3.6.	Zona de formação do extrusado	40
3.4.	Processo de extrusão de filme por sopro	41
3.5.	Condições de processamento do Polietileno de Baixa Densidade	48
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
5.	REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

É possível encontrar finalidade para os plásticos em quase todos os ramos da indústria. Essa diversidade de uso deve-se aos plásticos apresentarem grande desempenho técnico, o que leva a uma boa qualidade dos produtos. De acordo com a Associação Brasileira do Plástico (ABIPLAST), o Brasil representa apenas 2% da produção mundial de plásticos. Valor bem inferior aquele apresentado pelo país líder na produção mundial de plásticos, a China produziu cerca de 69 milhões de toneladas em 2012 enquanto o Brasil produziu apenas 6 milhões. O Brasil possui 11.670 empresas do setor de transformação de plástico sendo que 93% são consideradas pequenas e microempresas. Ainda de acordo com a ABIPLAST a extrusão representa a maioria dos processos produtivos utilizados na produção de transformados plásticos, e o polietileno de baixa densidade (PEBD) foi responsável por 13% do mercado de resinas consumidas no Brasil (ABIPLAST, 2013).

O objeto do processamento de polietileno é converter os *pellets* ou pó da matéria-prima em produtos acabados (ALBUQUERQUE, 2001). Dentre as técnicas disponíveis para esse processamento a extrusão é a mais utilizada, por ela é possível criar produtos por meio de um processo contínuo. Diferentes matrizes podem ser acopladas no final da extrusora permitindo a obtenção de uma grande variedade de produto final, dentre eles, pode-se utilizar o processo de sopro de filmes. Filmes e bobinas são os exemplos mais clássicos para os produtos decorrentes da extrusão com o balão de sopro ao final do processo. A extrusora também é utilizada quando se produz produtos injetados, neste processo a extrusão é uma etapa inicial na qual converte o material sólido em material fluido que será injetado em formas específicas. Potes, brinquedos, tampas e tonéis são exemplos de materiais produzidos a partir da extrusão seguida da injeção (PEACOCK, 2000; PISTOR et al., 2010; DOS SANTOS, 2006).

Neste trabalho propõe-se uma revisão do processo de extrusão de filmes de polietileno de baixa densidade por sopro, e como objetivo estudar e discutir os conhecimentos teóricos da literatura brasileira e também na

literatura mundial. Para alcançar esse objetivo serão realizadas pesquisas relacionadas aos materiais e suas peculiaridades, além de uma revisão de todo o processo e das principais características da extrusão.

2. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão na literatura científica disponível nos sites da *Scielo*, *Google Acadêmico*, *Wiley Periodicals* e *Polímeros - Ciência e Tecnologia* - nos meses de setembro e dezembro de 2014 e janeiro e fevereiro de 2015.

Foi realizado um levantamento dos descritores relacionados ao tema "extrusão", "extrusão de polietileno", "processamento de polietileno", "polietileno", "polietileno de baixa densidade", "polímeros", "EXTRUSION", "POLYETHYLENE", "POLYETHYLENE PROCESSING", "BLOW FILM", "POLYMERS". Os critérios para inclusão foram: título ou resumo relacionado ao tema; artigos em português e inglês que discutiam sobre o processo de extrusão de filmes de polietileno de baixa densidade por sopro e sobre os materiais utilizados. Os critérios de exclusão foram: referências sem resumo, publicações não científicas, estudos desfocados do tema do trabalho.

Devido ao baixo número de artigos publicados na área de extrusão de filmes por sopro, foi utilizado livros que descreviam o processo de forma mais detalhada. Entretanto, o baixo número de livros disponíveis sobre o tema, fez com que a pesquisa restringisse a poucos livros, sendo a maioria de literatura inglesa por apresentar uma descrição mais detalhada do processo.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. POLÍMEROS

Desde os primeiros relatos da humanidade os homens têm explorado os polímeros de origem animal e vegetal para suas necessidades. Couro,

madeira, lã, e algodão são exemplos de materiais poliméricos utilizados desde os primórdios (YOUNG & LOVELL, 2011). A origem da indústria dos polímeros é comumente relatada em inícios do século XIX, quando Thomas Hancock e Charles Goodyear começaram a pesquisar a composição e a estrutura molecular dos polímeros, devido principalmente ao desenvolvimento de produtos a base borracha. A partir dessa pesquisa, descobriu-se décadas depois, que poderia-se modificar quimicamente as polímeros naturais para produzir produtos poliméricos mais úteis às necessidades humanas. Nathaniel Hayward, Alexander Parkes, Christian Schonbein, além dos pesquisadores iniciais Hancock e Goodyear, foram responsáveis por essas pesquisas que desenvolveram inúmeros materiais poliméricos (WHITE, 1988).

Embora a indústria de polímeros já estivesse estabelecida nesta época, o desenvolvimento estava restrito pelo desconhecimento da estrutura química dos polímeros. Por mais de séculos, cientistas retratavam propriedades não usuais aos polímeros por considerarem que eram compostos de uma associação física de pequenas moléculas, coloides (YOUNG & LOVELL, 2011). Hermann Staudinger foi o responsável por elucidar, em 1920, a moderna teoria da estrutura dos polímeros, utilizada até os dias atuais, embora tenha sido bastante contestada no início (CANEVAROLO JR, 2010). De acordo com Staudinger, os polímeros eram compostos de grandes moléculas que continham longa sequência de simples unidades ligadas por ligação covalentes. Assim, Staudinger introduziu o conceito de "macromolécula" para descrever os polímeros. Sua base teórica era fundamentada nas longas cadeias poliméricas com unidades de repetição, e apresenta o mesmo conceito teórico das unidades de repetição utilizadas nos dias atuais (WHITE, 1988). Fato que justifica a utilização da terminologia polímeros de origem grega, onde o termo significa *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição).

De acordo com White (1988), os polímeros geralmente são caracterizados por alta massa molecular e longas cadeias de moléculas. Em casos mais simples, como o caso do polietileno, os polímeros constituem-se de apenas uma unidade repetitiva. De acordo com Young e Lovell (2011), essas longas cadeias poliméricas podem ser classificadas em linear e outras

formas não lineares como cíclica, ramificadas, dendrímeros ou em redes interpenetradas, como representado na Figura 1.

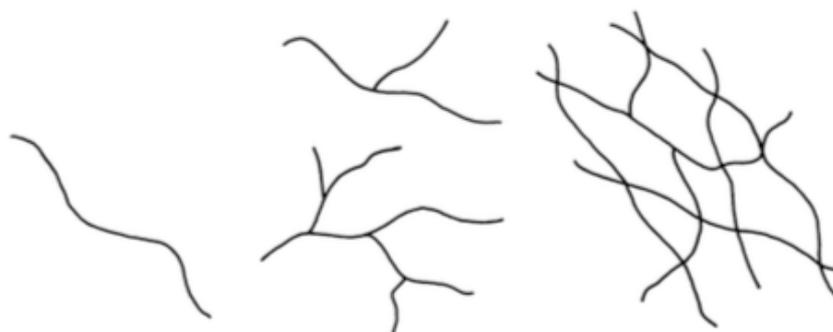


Figura 1: Estruturas representativas para os polímeros (a) lineares (b) ramificados (c) redes interpenetradas.

Fonte: Young & Lovell, 2011

A variação nas estruturas resulta em modificações nas propriedades. Um polímero contendo a mesma unidade monomérica pode dar origem a polímeros com estruturas químicas distintas. Para exemplificar, temos as diferenças apresentadas no ponto de fusão pelo polietileno de baixa densidade, com estrutura ramificada, e o polietileno de alta densidade, com estrutura linear, o primeiro apresenta o ponto de fusão cerca de 20° C inferior ao segundo (YOUNG & LOVELL, 2011).

Os polímeros também podem ser classificados de acordo com tipo de monômeros em homopolímeros e copolímeros. Os homopolímeros são polímeros formados apenas por um tipo de monômero, entretanto Young e Lovell (2011) definem esse termo de uma forma mais ampla. Estes autores descrevem homopolímeros como aqueles que possuem estruturas que podem ser representadas por múltiplas repetições de uma única unidade na qual pode conter uma ou mais espécies da unidade de monômero. Já os copolímeros são aqueles derivados de mais de um tipo de monômero, e seguindo a mesma lógica para os copolímeros, este termo pode ser empregado para polímeros que possuem moléculas com dois ou mais tipos diferentes de unidades de repetição (CANEVAROLO JR, 2010; YOUNG & LOVELL, 2011). A Figura 2 apresenta possíveis estruturas para os homo e copolímeros.

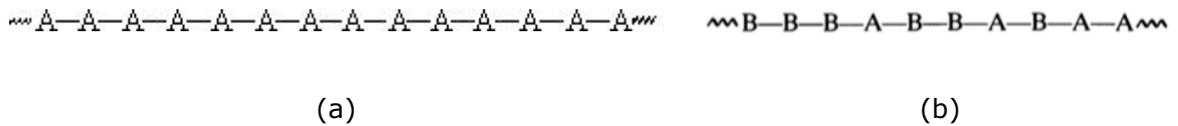


Figura 2: Estrutura representativa de (a) homopolímero e (b) copolímero.

Fonte: Young & Lovell, 2011

A forma mais comum de classificação baseando-se nas propriedades térmicas e mecânicas dos polímeros são: termoplástico, elastômeros, e termofixos (ou termorrígidos). Os termoplásticos, também chamados de plásticos, são aqueles polímeros lineares e ramificados que se fundem sob a aplicação de calor ou pressão. Assim, eles podem ser moldados, e posteriormente remoldados, em qualquer formato que se queira, por exemplo empregando as técnicas de processamento como extrusão e injeção. Em uma análise mais profunda, os termoplásticos podem ser divididos ou classificados como cristalinos, semicristalinos e amorfos (não-cristalinos) (CANEVAROLO JR, 2010; YOUNG & LOVELL, 2011).

Os elastômeros são polímeros, que a temperatura ambiente, podem ser deformados facilmente sob ação de uma força, e conseguem retornar as dimensões originais rapidamente, quando a força aplicada ao polímero é retirada (CANEVAROLO JR, 2010). Já os polímeros termofixos são aqueles polímeros mais rígidos que possuem um alto grau de reticulação, com elevado número de ligações cruzadas (*cross linking*). Esse elevado grau de reticulação resulta em uma maior rigidez do polímero, assim uma vez formado não podem ser remoldados com aquecimento, como os termoplásticos são (CANEVAROLO JR, 2010; YOUNG & LOVELL, 2011).

3.1.1. POLIETILENO

Embora a primeira síntese do polietileno (PE) tenha ocorrido apenas em 1898, pelo químico alemão Hans Von Pechmann, durante o processo de aquecimento do diazometano, sua primeira ocorrência foi relatada apenas em 1933 como o polímero de baixa densidade (PEBD) (PEACOCK, 2000).

Seis anos depois, ocorreu a primeira produção industrial do polietileno de baixa densidade. Enquanto, o polietileno de alta densidade (PEAD) só foi sintetizado vinte anos depois, em 1953, e sua primeira produção industrial ocorreu apenas em 1955 (CANEVAROLO JR, 2010).

No início da comercialização, em 1940, houve um baixo crescimento no consumo, mas após esse período o polietileno tem sido produzido em grandes escalas e tem apresentado um considerável crescimento (BILLMEYER JR, 1984; MAHDAVI & NOOK, 2008). Albuquerque (2000) relata que apenas no final da década de 1950, o polietileno teve sua primeira produção industrial no Brasil, sendo assim o primeiro termoplástico a ser produzido no país.

O polietileno, em sua estrutura planar, é constituído pela repetição do monômero $-(CH_2)_n-$ e finalizado com grupos CH_3 . O comprimento das ligações de C-C é cerca de $1,54 \times 10^{-7} \mu m$ e o ângulo de ligação entre os carbonos é de $109,5^\circ$, por serem carbonos tetraédricos (WALSILKOSKI, 2002; MANO, 2003).

Peacock (2000) e Coutinho *et al.* (2003) descrevem o polietileno como um polímero semicristalino, flexível, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela relação entre as fases amorfa e cristalina. Albuquerque (2000) ressalta que características como leveza, fácil processamento e baixo custo tornam o polietileno um excelente material para a indústria. Este fato pode ser comprovado pela extensa utilização do polietileno em substituição a materiais tradicionais, por exemplo a substituição de peças metálicas em diversos produtos. Atualmente, o maior volume de polímero utilizado na atualidade é representado pelo polietileno.

3.1.2. TIPOS DE POLIETILENO

Coutinho *et al.* (2003) destacam que os polietilenos podem ser divididos em cinco diferentes categorias, sendo considerada as diferentes condições reacionais e do sistema catalítico empregado na síntese de cada tipo de polietileno. Os cinco tipos de polietileno são classificados em:

- Polietileno de Baixa Densidade (PEBD ou no inglês *LDPE*)
- Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou no inglês *HDPE*)
- Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD ou no inglês *LLPDE*)
- Polietileno de Ultra Peso Molecular (PEUAPM ou no inglês *UHMWPE*)
- Polietileno de Ultra Baixa Densidade (PEUBD ou no inglês *ULDPE*)

Ainda segundo Coutinho *et al.* (2003), os polietilenos eram classificados de acordo com a densidade apresentada e pelo tipo de processo utilizado na fabricação, entretanto atualmente considera-se as ramificações para classificar os polietilenos. Portanto, os polietilenos são classificados entre polietilenos lineares e os polietilenos ramificados. Walsikoski (2002) afirma que a linearidade do polímero está relacionada com a sua rigidez, por outro lado, a ramificação está relacionada ao maior ponto de fusão, maior força de tensão e maior dureza.

De acordo com Sinfrônio (2006), as diferentes propriedades dos polímeros são essenciais para a caracterização dos mesmos. Propriedades como densidade, índice de fluidez, características de processamento, resistência química, opacidade, e propriedades superficiais e mecânicas são comumente utilizadas para classificar e assim diferenciar os diferentes tipos de polímeros. O autor ainda exemplifica que a American Society for Testing and Materials utiliza a norma ASTM D-1248-05 para classificar os diferentes tipos de polietileno de acordo com a densidade. A Tabela 1 mostra a classificação dos polímeros de acordo a essa norma.

Tabela 1: Classificação dos polietilenos de acordo com a norma ASTM D-1248-05

Tipo	Faixa de densidade (g.cm⁻³)	Tipo de polietileno
I	0,910 – 0,925	PEBD, PELBD
II	0,926 – 0,940	PEMD
III	0,941 – 0,960	PEAD
IV	> 0,960	PEAD

Fonte: Sinfrônio, 2006

White (1988) esclarece que a densidade está relacionada com a cristalinidade do polietileno, que está relacionada com a presença de ramificações no polietileno. Assim, o polietileno de alta densidade apresenta uma elevada cristalinidade, que pode ser relacionada com a linearidade das cadeias de polietileno. Já o polietileno de baixa densidade apresenta baixa cristalinidade devido a existência de ramificações, que reduzem a cristalinidade do polietileno.

3.1.2.1. POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE

De acordo com Peacock (2000), o polietileno de baixa densidade (PEBD) apresenta grandes quantidades de ramificações que reduzem a cristalinidade, resultando em um material com baixa densidade. A Figura 3 mostra uma estrutura representativa para o polietileno de baixa densidade com suas inúmeras ramificações.

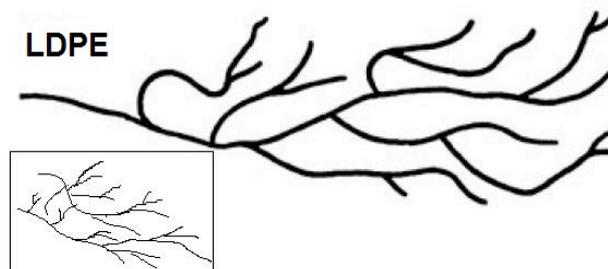


Figura 3: Estrutura representativa do polietileno de baixa densidade

Fonte: Disponível em: www.tudosobreplasticos.com

O monômero etileno (C_2H_4) gasoso é utilizado na síntese polimérica do polietileno. Quando se deseja obter o PEBD, a síntese deve ocorrer a altas pressões (entre 1.000 e 3.000 atmosferas) e altas temperaturas (entre 100 e 300°C) (COUTINHO et al., 2003). Os iniciadores utilizados para esta síntese são o oxigênio molecular, peróxidos e hidroperóxidos, enquanto os solventes, geralmente utilizados são o benzeno e o clorobenzeno

(WALSILKOSKI, 2002). Esse tipo de síntese ocorre via formação de radicais livres, iniciado pela quebra homolítica dos compostos de baixa instabilidade, como os peróxidos. Outro processo alternativo de produção do polietileno de baixa densidade apresentado por Billmeyer Jr. (1984) utiliza a polimerização em massa (*bulk polimerization*), sem a presença de solvente, em um reator do tipo torre. Essa polimerização ocorre sob pressão de 1500 atmosferas e temperaturas de 190° C.

Billmeyer Jr. (1984) descreve dois diferentes tipos de ramificações presente no PEBD. O primeiro tipo pode ocorrer devido à transferência de cadeia intermolecular que gera ramificações, em sua maioria, tão grandes como a própria cadeia polimérica do polietileno. Coutinho *et al.* (2003) afirmam que a viscosidade do polímero em solução é altamente dependente dessas longas ramificações, que determinam o grau de cristalização, as temperaturas de transição e afeta parâmetros cristalográficos como o tamanho dos cristalitos (COUTINHO *et al.*, 2003). O segundo tipo de ramificação possível para o polietileno ocorre devido à transferência de cadeia intramolecular, produzido via radicais livres, gerando ramificações menores. A presença dessas ramificações menores é expressivamente maior que as ramificações maiores (BILLMEYER JR, 1984).

Mahdavi e Nook (2008) demonstram que as ramificações, a massa molecular e a distribuição de massa do polietileno de baixa densidade são fundamentais para as características apresentadas por esse. As ramificações são de extrema importância reduzem a cristalinidade do polietileno afetando, conseqüentemente, a sua densidade. Várias propriedades apresentadas pelo PEBD também são dependentes da cristalinidade do mesmo, como por exemplo, resistência química, tensão, dureza entre outros (BILLMEYER JR, 1984).

A massa molecular no polietileno de baixa densidade afeta as propriedades que envolvem a fusão e a grandes deformações. Essa influência ocorre de forma inversamente proporcional, assim um aumento na massa molecular gera uma redução na tensão ao rasgo (*tear strength*) entre outras propriedades. A influência da distribuição da massa molecular nas propriedades do polietileno de baixa densidade está relacionada

proporcionalmente com a facilidade de processamento, mas é inversamente proporcional a propriedades como tensão de resistência, dureza e força de impacto entre outras propriedades (BILLMEYER JR, 1984; MANO, 2003).

Atualmente o PEBD é o polietileno industrial com maior destaque por apresentar propriedades reológicas únicas em comparação com os polietilenos lineares, devido as suas longas cadeias altamente ramificadas (PISTOR et al., 2010). Segundo Coutinho *et al.* (2003) a combinação das propriedades: tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis, torna o PEBD um polímero interessante para o mercado. O polietileno de baixa densidade, assim como qualquer outro polietileno, é inerte a maioria dos solventes devido sua natureza parafínica, alta massa molecular e estrutura parcialmente cristalina, podendo ser utilizado para finalidades farmacêuticas e alimentícias. Entretanto, deve-se ficar atento a quaisquer aditivos utilizados no processo de fabricação, pois um aditivo tóxico é capaz de tornar o polietileno inviável para o contato com produtos farmacêuticos e alimentícios (COUTINHO et al., 2003; ANVISA, 2008).

Essas propriedades tão versáteis do polietileno de baixa densidade o torna um material com grande potencial para ser processado por extrusão e injeção nas mais diversas condições, podendo ser utilizados na produção de embalagens agrícolas, industriais, alimentícias, farmacêuticas, hospitalares e domésticas (COUTINHO et al., 2003; MANO, 2003).

3.2. PROCESSO DE EXTRUSÃO

O processo de extrusão é caracterizado por ser um processo contínuo no qual há a mistura de materiais que passam pelo estado viscoso durante o processo. Para o processamento de polietileno, o material é introduzido na forma sólida, *pellets* ou pó, juntamente com outros materiais como aditivos, antioxidantes, pigmentos, dessecantes entre outros materiais. Durante o processo de extrusão, esses materiais são fundidos, homogeneizados, pressurizados e bombeados para a matriz da extrusora (MANRICH, 2005).

De acordo com Giles Jr. *et al.* (2004) e Rauwendaal *et al.* (2014), para otimizar o processo de extrusão, não basta conhecer o equipamento, suas características e seu funcionamento, é essencial o conhecimento do material utilizado na extrusão, e as variáveis decorrentes desse material sobre o processo de extrusão.

3.2.1. EQUIPAMENTO

Os principais componentes para a extrusora monorosca (rosca única ou no inglês *single-screw extruder*) estão mostrados na Figura 4 a seguir.

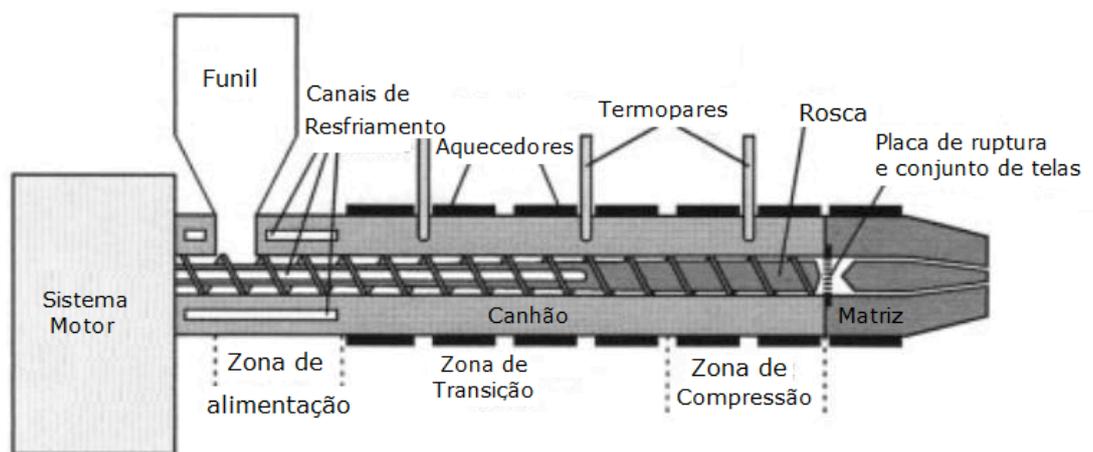


Figura 4: Principais componentes da extrusora monorosca.

Fonte: Peacock, 2000.

A extrusora pode ser dividida em cinco componentes majoritários que são (GILES Jr. *et al.*, 2004; CANTOR, 2011):

- Sistema motor (*Drive system*)
- Sistema de alimentação (*Feed System*)
- Sistema de rosca, canhão e aquecedores (*Screw, barrel, and heaters system*)
- Cabeçote e matriz (*Head and die assembly*)

- Sistema de controle (*Control system*)

3.2.1.1. SISTEMA MOTOR

De acordo com Giles Jr. *et al.* (2004), o sistema motor é formado pela caixa de engrenagem (*gear box*), a engrenagem principal (*bull gear*), e o conjunto de rolamentos axiais (*thrust bearing assembly*). O sistema motor é o responsável por girar a rosca a uma velocidade constante ou em diferentes velocidades, sob torque suficiente para que o polímero seja processado.

Existem basicamente dois tipos de motores utilizados nas extrusoras, que são diferenciados pelo tipo de corrente elétrica por eles utilizados. O primeiro, e mais comum, é o motor corrente contínua (*Direct Current Motor - DC motor*) no qual há uma conversão da velocidade de rotação do motor, em rotações por minuto (rpm), para a rotação de velocidade da rosca, também em rpm. Entretanto, atualmente a alternativa para os motores de corrente contínua são os motores de corrente alternada (*Alternating Current Motor - AC motor*) que são encontrados em extrusoras menores, pois não necessitam de utilizar a rotação máxima para obter o máximo torque, sendo assim mais econômicos (CANTOR, 2011).

A configuração do sistema motor pode ser dividida em duas configurações diferentes, o sistema motor direto (*direct drive system*) - representado pela Figura 5 (a) - e o sistema motor indireto (*indirect drive system*) - representado pela Figura 5 (b).

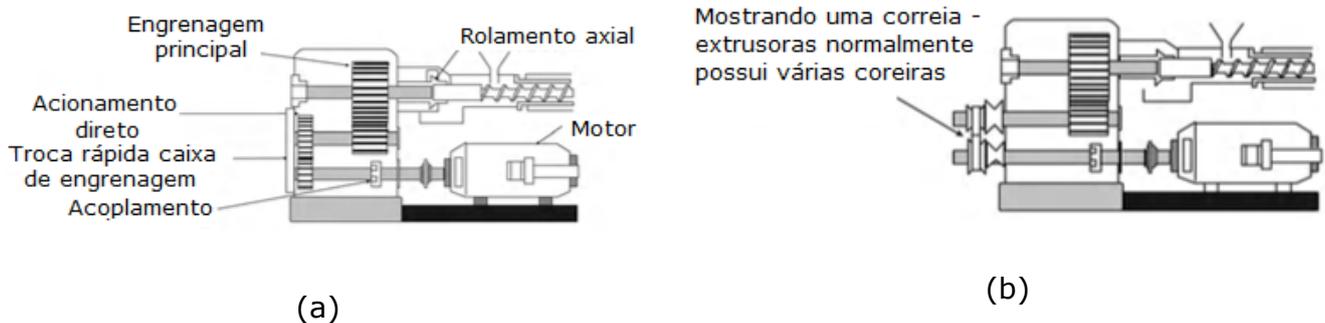


Figura 5: Sistema motor (a) direto; (b) indireto

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

O sistema de motor direto, ilustrado na Figura 5 (a), utiliza uma rápida troca na caixa de engrenagens para converter a rotação do motor na rotação desejada da rosca. Entretanto, Giles Jr. *et al.* (2004) ressaltam que é importante verificar se o motor possui a potência para gerar o torque suficiente para extrusar o material, pois um aumento insuficiente no torque irá aumentar o gasto energético e não irá processar o material.

O sistema de motor indireto, ilustrado na Figura 5 (b), utiliza roldanas para transmitir a rotação do motor para a rosca, nesta Figura há a representação de apenas duas roldanas, entretanto há de três a cinco roldanas interligando o motor à rosca. A correia é responsável por interligar essas roldanas de forma a transmitir a rotação entre elas. Para alterar a velocidade de rotação da rosca, é necessário alterar o tamanho das roldanas (GILES Jr. et al., 2004; CANTOR, 2011).

3.2.1.2. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação é composto pelo funil de alimentação (*feed hopper*), pelo gargalo de alimentação (*feed throat*) e pela secção de alimentação da rosca (*screw feed section*) (GILES Jr. et al., 2004). O funil de alimentação é o local onde há a deposição das matérias-primas, que podem estar na forma de *pellets*, pó, grânulos, aparas ou a combinação delas (MANRICH, 2005). De acordo com Giles Jr. *et al.* (2004), existem quatro maneiras de alimentar uma extrusora rosca simples que dependem do tipo de funil utilizado. Os tipos de funis utilizados podem ser:

- Funil de alimentação por inundação (*Flood feed*)
- Funil de alimentação proporcional (*Starve feed*)
- Funil de alimentação induzida (*Crammer*)
- Funil de alimentação fundida (*Melt feed*)

Dentre os tipos de funis utilizados para a alimentação, o mais comum é o funil de alimentação por inundação na qual os materiais estão dispostos diretamente no funil (*hopper*), localizado acima da zona de alimentação da rosca. O funil controla a alimentação de material da extrusora por ação da gravidade, assim à medida que o material vai sendo extrusado desce em direção à rosca da extrusora. Na alimentação por inundação, a taxa de produção da extrusora é diretamente proporcional à velocidade da rosca (GILES Jr. et al., 2004; CANTOR, 2011; HARPER, 2006). A Figura 6 representa o desenho esquemático de uma extrusora com alimentação por inundação.

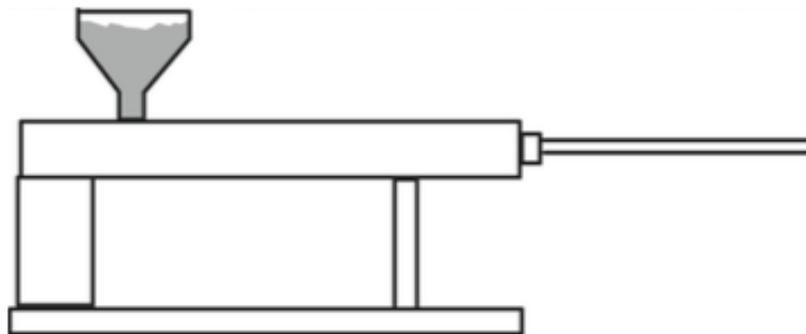


Figura 6: Desenho esquemático da extrusora com alimentação por inundação.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

A alimentação do funil pode ser tanto manual quando automática. Para a alimentação manual deve-se utilizar imãs do tipo grade no fundo do funil para reter qualquer tipo de partículas metálicas que certamente irão danificar a rosca ou o cilindro da máquina (CANTOR, 2011; HARPER, 2006).

O funil de alimentação proporcional também utiliza a gravidade para alimentar a extrusora, entretanto esse tipo de alimentação é mais comum em extrusoras de rosca dupla onde há uma mistura de polímeros utilizada. As matérias-primas são depositadas nos diferentes funis, e assim destinadas para o funil que conecta com a secção de alimentação da rosca. Neste tipo de funil não há o acúmulo de material no gargalo de alimentação

e a proporção dos polímeros é determinada pelo funil de alimentação proporcional, fato que gera uma exata proporção dos materiais a serem utilizados (GILES Jr. et al., 2004). A Figura 7 apresenta um desenho esquemático de uma extrusora que possui a alimentação pelo funil de alimentação proporcional.

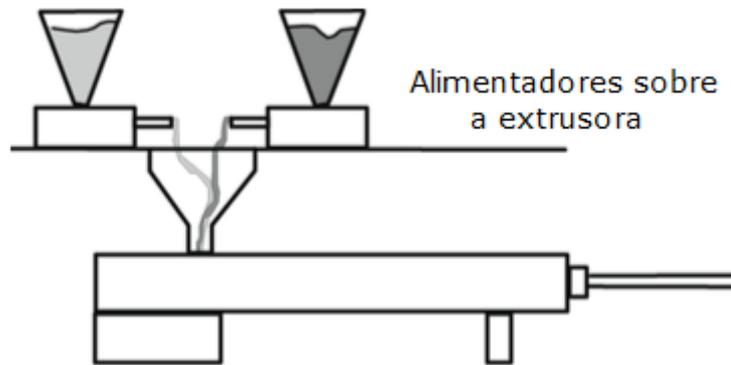


Figura 7: Desenho esquemático da extrusora com alimentação por funil de alimentação proporcional.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

Vale ressaltar que esses alimentadores (*feeders*) devem estar posicionados diretamente acima do gargalo de alimentação para depositarem o material diretamente na extrusora, sem que haja um acúmulo de material no funil inferior (GILES Jr. et al., 2004).

O funil de alimentação induzida, como demonstrado na Figura 8, é utilizado para materiais com uma baixa densidade, materiais que tendem a compactar, ou outros materiais de difícil escoamento no funil (GILES Jr. et al., 2004).

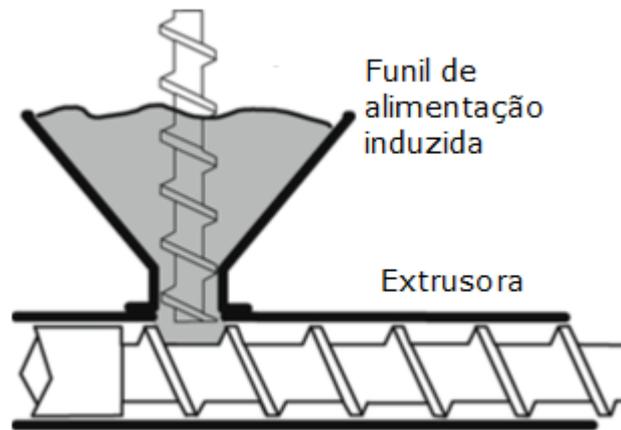


Figura 8: Desenho esquemático da extrusora com alimentação por funil de alimentação induzida.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

A rosca do funil de alimentação induzida aumenta a pressão no sentido de direcionar o material para secção de alimentação da rosca. Deve-se tomar cuidado para não alimentar em excesso a extrusora, de forma que o material que não esteja fundido seja forçado para a secção de compressão (*metering section*), onde há material fundido (GILES Jr. et al., 2004).

A extrusora que possui a alimentação por funil de alimentação fundida possui um tamanho menor que as demais pelo fato de não ser necessário fundir o polímero. O funil basicamente possui uma bomba que gera um polímero fundido uniformemente na temperatura e pressão adequada para a matriz (*die*) (GILES Jr. et al., 2004). A Figura 9 apresenta uma ilustração para a extrusora com alimentação fundida.

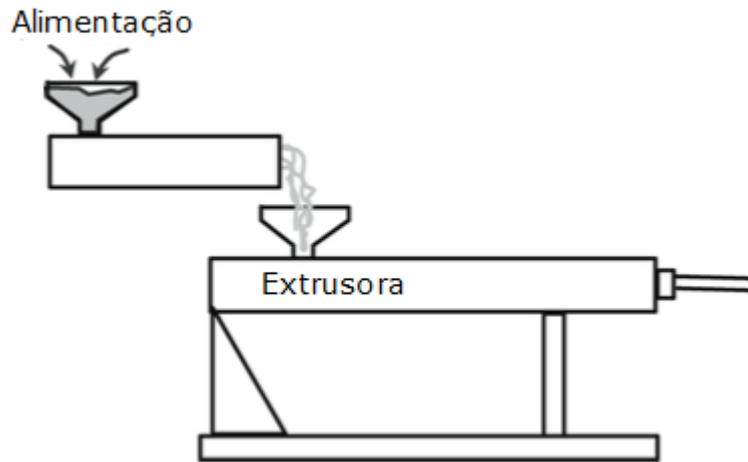


Figura 9: Desenho esquemático da extrusora com alimentação fundida.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

Ainda no sistema de alimentação, Giles Jr. *et al.* (2004) descrevem os canais de resfriamento (*cooling channels*), Figura 10, que estão presentes na secção de alimentação. Esses canais são responsáveis por removerem o excesso do calor gerado pelo atrito entre a rosca, no seu movimento rotacional, e os pellets que estão comprimidos no canhão da extrusão. Estes canais de resfriamento são extremamente importantes para prevenir que o material sofra fusão prematuramente, o que inviabilizaria o processo de extrusão.

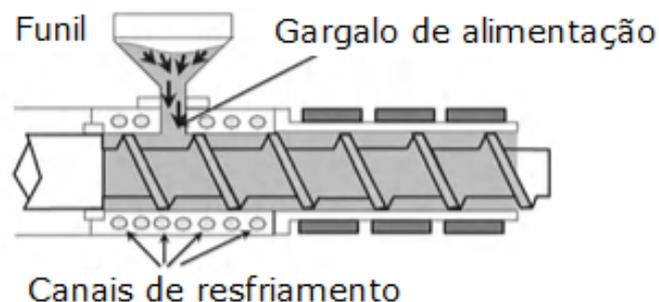


Figura 10: Canais de resfriamento (*Cooling channels*) na extrusora

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

3.2.1.3. SISTEMA DE ROSCA, CANHÃO E AQUECEDORES

O sistema de rosca, canhão e aquecedores é o local onde ocorre a fusão e mistura das matérias-primas no processo de extrusão, assim o produto extrusado é transportado para a matriz da rosca (MANRICH, 2005; HARPER, 2006).

Sem dúvidas, a rosca é um dos componente mais importante da extrusora. Dentre suas funções estão: transportar, fundir ou amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. Com um desenho específico e calculado, a rosca, ao girar, gera um cisalhamento no material gerando cerca de 80% da energia térmica e mecânica necessária para extrusar por exemplo o PE. Para se obter o restante da energia necessária para a extrusão, as extrusoras utilizam aquecedores externos, que além de fornecerem essa energia extra para a extrusão do material, auxiliam na prevenção do sobreaquecimento e degradação do material (GILES Jr. et al., 2004). De acordo com Manrich (2005), a utilização destes aquecedores elétricos deve ser minimizado o máximo possível reduzindo o gasto de energia no processo, devido ao elevado tempo necessário para fundir o material via aquecedores externos.

Portanto, a rosca deve ser projetada de forma que sua geometria promova a máxima eficiência, vazão constante, plastificação, e homogeneidade. Vale ressaltar que a rosca não pode danificar o material e deve apresentar uma boa durabilidade (MANRICH, 2005). Além disso, Piva e Wiebeck (2004), esclarecem que a escolha da rosca depende do tipo de material a ser extrusado. A escolha adequada pode gerar ganhos de produtividade de até 20%, além de diminuir possíveis perdas.

A Figura 11 apresenta o desenho esquemático para o sistema de rosca, canhão e aquecedores de uma extrusora monorosca.

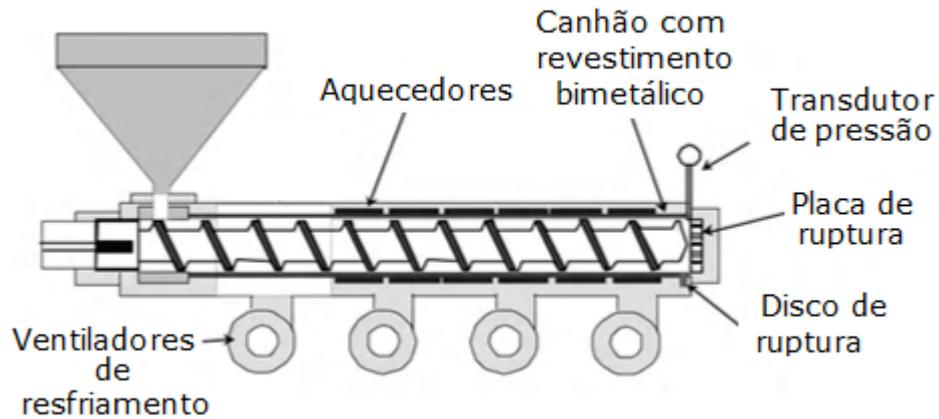


Figura 11: Desenho esquemático para o sistema de rosca, canhão e aquecedores de uma extrusora monorosca.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

3.2.1.3.1. SISTEMA DE ROSCA

A extrusora monorosca apresenta a rosca de acordo com o desenho esquemático mostrado na Figura 12.

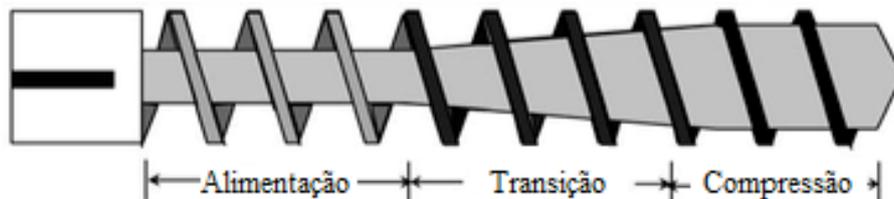


Figura 12: Desenho esquemático da rosca de uma extrusora monorosca.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

Percebe-se que há claramente três regiões distintas nessa rosca representada pela Figura 12, essas regiões são denominadas: região de alimentação (*Feed section*), região de transição (*Transition section*) e região de compressão (*Metering section*). A região de alimentação é responsável por transportar os pós ou *pellets* para região de transição, afastando-os da região de alimentação. Esse transporte é realizado pelos canais que são mais fundos nessa região, sendo assim propícios para o transporte. Na

região de transição, há uma transição gradual dos canais profundos para canais mais rasos em que há a compressão do material resultando no início da fusão do material. A última região denominada região de compressão é a região que apresenta os canais mais rasos e estreitos, assim o material é ainda mais comprimido que na região anterior aumentando a taxa de fusão do material (GILES Jr. et al., 2004; RAUWENDAAL et al., 2014; HARPER, 2006).

Razão de compressão da rosca (RC) é definida pela razão entre a profundidade da zona de alimentação (*Depth Feed Zone*) e a profundidade da zona de compressão (*Depth Metering Zone*). Essa propriedade está vinculada as propriedades viscoelásticas. Assim, como os polímeros apresentam diferentes propriedades viscoelásticas, eles irão apresentar diferentes razões de compressão. Já a razão entre o comprimento da rosca (L) e o diâmetro (D) são parâmetros essenciais para a escolha de uma rosca adequada a um determinado processo. Além desses parâmetros, Giles Jr. et al. (2004) e Manrich (2005) mencionam quais outros fatores são importantes na escolha de uma rosca, são eles: polímero a ser processado, capacidade produtiva, a profundidade da zona de alimentação e da zona de compressão, números de filetes em cada zona, o ângulo da rosca, os aditivos a serem utilizados no processo.

Para controlar o desgaste da rosca, Giles Jr. et al. (2004) mencionam que deve-se anotar todas as dimensões da rosca para posteriormente poder comparar com as dimensões futuras e assim determinar o desgaste da rosca, que pode ser causado por diferentes fatores como iniciar o processo de extrusão sem polímero presente, processar material diferente para o que a rosca foi produzida, mal alinhamento da rosca, aditivos abrasivos, entre outros fatores.

3.2.1.3.2. CANHÃO E AQUECEDORES

De acordo com Cantor (2011), o sistema de aquecimento (*heaters*) deve cobrir a máxima área possível da superfície total do canhão (*barrel*), evitando que haja pontos cujas temperaturas sejam distintas garantindo assim um aquecimento uniforme.

O sistema de resfriamento, composto pelos ventiladores de resfriamento (*cooling fans*), também é utilizado para controlar a temperatura no canhão. Na zona de alimentação, esse resfriamento tem o papel fundamental de prevenir que o polímero seja fundido. Caso haja a fusão na zona de alimentação da rosca, o material pode grudar na rosca – devido a maior profundidade dos canais que tende a acumular material – o que impedirá o processo de extrusão. O sistema de resfriamento pode funcionar tanto com água quanto com ar. Quando se utiliza água para o resfriamento do canhão, as vantagens são que a água possui uma melhor transferência de calor que o ar, portanto resulta em um melhor controle. Mas a utilização da água requer tratamento da água que recircula no sistema, além de elevados custos na instalação e manutenção. Quando se utiliza ar para o resfriamento do canhão, há um menor custo mas há um considerável aquecimento na região externa da extrusora devido ao ar quente que é forçado para fora do canhão (GILES Jr. et al., 2004).

Segundo Giles Jr. et al. (2004), o material da superfície interna do canhão deve apresentar uma resistência maior do que o material da rosca para evitar que o canhão se desgaste ao invés da rosca. As roscas tendem a desgastarem muito mais rápido que o canhão o que resulta na necessidade de troca ou manutenção da rosca. Para evitar que haja um desgaste desnecessário ou outros danos, é extremamente importante que a rosca e o canhão estejam alinhados e nivelados corretamente.

3.2.1.4. CABEÇOTE E MATRIZ

Manrich (2005) define o cabeçote como todo o conjunto que fica à frente da rosca, portanto o início do cabeçote é representado pela matriz que forma as linhas contínuas (macarrão) da matéria-prima. Essa definição varia um pouco para extrusão de filmes por sopro, sendo o início da matriz representado pelo final do cabeçote. Para a matriz de que forma as linhas contínuas da matéria-prima, no início do cabeçote (*extruder head*), ou no início da matriz, há uma placa de ruptura (*breaker plate*) que contém um transdutor de pressão (*pressure transducer*) para medir a pressão na matriz

da extrusora. Elevadas pressões no canhão são extremamente perigosas e devem ser evitadas. Caso a pressão na matriz se exceda de forma repentina ou inesperada, o disco de ruptura (*rupture disk*) se rompe aliviando a pressão. Segundo Giles Jr. *et al.* (2004), os canhões das extrusoras são feitos para suportar cerca de 10.000 psi de pressão, enquanto os discos de rupturas são feitos para suportar pressões inferiores a esses 10.000 psi.

De acordo com Rauwendaal. *et al.* (2014), a placa de ruptura tem como função selar a conexão entre o fim da extrusora e o início do cabeçote/matriz, além de parar o movimento espiral do polímero que sai da extrusora. Assim, o polímero é forçado a passar pelos buracos da placa formando linhas contínuas (macarrão) da matéria-prima. A Figura 13 apresenta a placa de ruptura e sua localização ao final da extrusora. As telas (*screens*), ou grelhas segundo Manrich (2005), que estão posicionadas a frente da placa de ruptura são importantes para filtrar o material proveniente da extrusora. A utilização e a manutenção dessas telas irão depender do tipo de material extrusado e do cabeçote a ser utilizado.

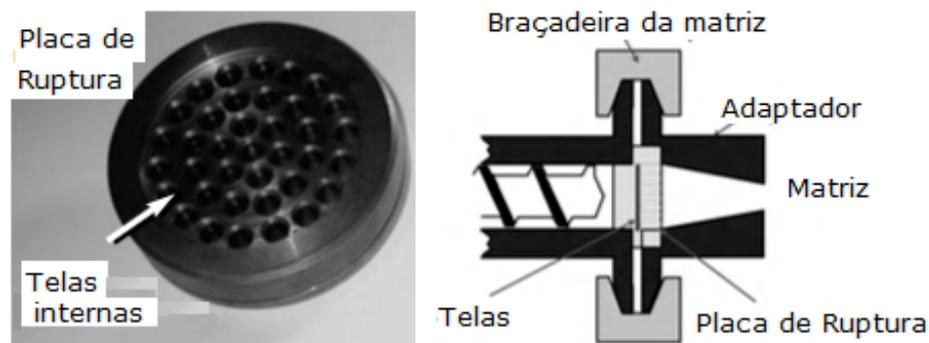


Figura 13: Placa de ruptura e sua localização ao final da extrusora.

Fonte: Giles Jr. *et al.*, 2004

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), a matriz tem como função moldar o material fundido proveniente da extrusora produzindo as dimensões desejadas sob uma específica taxa de transferência. Além disso, os autores ressaltam que a matriz contribui tanto para a orientação molecular do produto quanto para a aparência superficial do produto. A escolha adequada da matriz deve garantir a fácil manutenção, eficiente isolamento entre os elementos de forma a prevenir qualquer vazamento do

material, fácil e rápida conexão/desconexão da matriz com a extrusora, suficiente resistência mecânica para suportar a deformação sob pressão, suficiente capacidade elétrica para promover o aquecimento uniforme.

É possível encontrar uma grande variedade tanto de cabeçotes quanto de matrizes utilizados no processo de extrusão. A escolha para determinado cabeçote e matriz irá depender do processo de extrusão e do tipo de produto final a ser produzido (GILES Jr. et al., 2004; RAUWENDAAL et al., 2014). A Figura 14 apresenta um desenho esquemático da matriz mais utilizada para a extrusão de filmes por sopro.

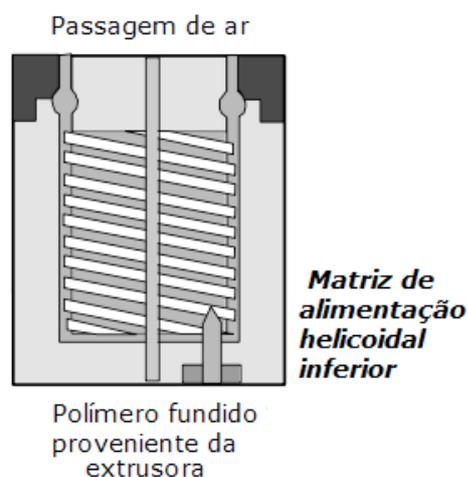


Figura 14: Desenho esquemático de uma matriz para extrusão de filmes por sopro.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

A matriz pode ser acoplada diretamente na extrusora, em um tubo de transferência (*transfer pipe*), ou até mesmo em um adaptador. Tanto os tubos de transferência quanto os adaptadores devem ser capazes de manter a temperatura de fusão do material, assim é comum haver regiões de aquecimento que tem por objetivo minimizar ao máximo áreas em que haja variação na temperatura (GILES Jr. et al., 2004).

3.2.1.5. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle é responsável pelo controle do processo de extrusão como um todo, sendo possível realizar alterações que irão afetar todo o processo. Nos últimos anos houve uma melhora significativa do controle do processo de extrusão devido aos avanços apresentados pela tecnologia. Assim, atualmente é possível obter um melhor controle e acompanhamento sobre o processo, sendo possível o monitoramento remoto de todo o processo. É possível acompanhar em tempo real o desenvolvimento de variáveis como: controle de temperatura, velocidade da rosca, temperatura de fusão, pressão de fusão, medidas de espessura ou outras dimensões, taxas de alimentação, entre outras (CANTOR, 2011).

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), o processo de extrusão é relativamente simples se comparado com outros processos de transformação do plástico pois a extrusora apresenta poucas variáveis que podem ser alteradas pelo operador. Desde que a rosca seja a correta para o processo, a matriz esteja devidamente instalada, as telas estejam limpas, os canais de resfriamento estejam funcionando corretamente, e os aquecedores e termopares estejam em perfeito funcionamento, as variáveis que serão possíveis de alterar pelo operador são o controle da temperatura e da rotação da rosca.

Para assegurar que o processo de extrusão funcione corretamente, alguns parâmetros devem ser monitorados durante todo o processo. Temperatura do canhão, carga da extrusora (porcentagem de carga e torque), velocidade da rosca, pressão e temperatura de fusão, canais de resfriamento são as variáveis que devem ser monitoradas para o perfeito funcionamento da extrusora (GILES Jr. *et al.*, 2004; CANTOR, 2011).

3.3. COMPORTAMENTO PLÁSTICO NA EXTRUSORA

O comportamento dos polímeros dentro da extrusora depende fundamentalmente da região de análise. De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), há seis zonas de processamento que devem ser destacadas devido ao comportamento plástico do polímero. São elas:

- Zona de alimentação (*Feed zone*)
- Zona de fusão ou plastificação (*Melt or plasticating zone*)
- Zona de transmissão da fusão (*Melt conveying zone*)
- Zona de mistura (*Mixing zone*)
- Zona de desvolatilização ou degasagem (*Devolatilization zone or degassing*)
- Zona de formação do extrusado (*Die forming zone*)

3.3.1. ZONA DE ALIMENTAÇÃO

Na zona de alimentação, o polímero escoar pelo funil de alimentação para o gargalo de alimentação e para a zona de alimentação da rosca. Nessa região o polímero começa a ser compactado pela extrusora. Giles Jr *et al.* (2004) apresentam duas características das matérias-primas que afetam a zona de alimentação de uma extrusora considerando o funil de alimentação por inundação, que é o sistema mais simples e utilizado para a alimentação. A primeira característica ocorre devido à diferença de densidade das matérias-primas, devido as diferentes formas físicas apresentadas. Os materiais que possuem a forma de pó ou pellets apresentam densidade inferior aqueles que são sólidos ou fundidos devido aos efeitos de empacotamento e a presença de ar entre as partículas do material.

A segunda característica que afeta a zona de alimentação é a compressibilidade do material, que é caracterizada pela habilidade do material de ocupar volume menor durante o transporte ou manuseio. Materiais que apresentam uma compressibilidade superior a 20% podem apresentar problemas de alimentação caso seja utilizado o funil de alimentação por inundação. Giles Jr *et al.* (2004) destacam que problemas como ponte (*bridging*), afunilamento (*funneling*) ou "caminho de rato" (*"rat holing"*) são problemas apresentados devido a segunda característica, a compressibilidade. Já o aprisionamento seletivo (*selective entrapment*) é um problema apresentado devido a primeira característica, devido a diferença de tamanho e densidade das partículas, que afeta a alimentação da extrusora.

Giles Jr *et al.* (2004) descrevem que fatores que impedem ou dificultam o fluxo livre do material pela ação da gravidade no funil de alimentação por inundação são os responsáveis pela formação da ponte que é formada transversalmente sobre a base do funil impedindo o fluxo normal do material, conforme apresentado pela Figura 15.



Figura 15: Desenho esquemático da formação de uma ponte no funil de alimentação por inundação.

Fonte: Giles Jr. *et al.*, 2004

A formação da ponte pode ocorrer tanto rapidamente quando lentamente, dependendo do mecanismo que resultou na formação. Geralmente materiais reciclados ou de baixa densidade apresentam uma rápida formação da ponte que ocorre em minutos. Já o aquecimento é o

responsável pela lenta formação da ponte. Com o aquecimento, materiais amolecem ou tornam-se pegajosos na parte inferior do funil formando a ponte de forma gradual até o momento que ocorre o completo impedimento do livre fluxo da matéria-prima para a extrusora (GILES Jr. et al., 2004).

A ação corretiva para a formação da ponte que impede o fluxo livre do material é a remoção mecânica do material do funil de alimentação ou a utilização de uma haste ou uma pá que será utilizada para remover a ponte formada. Para a remoção mecânica é necessário que o processo seja interrompido e a extrusora desligada, fato que altera a produção e muitas vezes é evitado. Assim a haste apresenta-se como uma boa alternativa para a remoção da ponte formada. É importante que o material da haste utilizada seja o mesmo material que está sendo processado, pois ao utilizar a haste pode ocorrer que a haste seja danificada pela rosca. Assim, não ocorrerá nenhuma contaminação na extrusão, pois mesmo que parte da haste seja processada pela rosca ela apresentará as mesmas características da matéria-prima. Pode-se também utilizar hastes de madeira, pois mesmo que a rosca processe a haste e pedaços de madeira sejam transportados pela rosca, eles serão retidos nos filtros. Entretanto, esses pedaços de madeira podem aumentar a pressão nos filtros além de aumentar o número de limpezas necessárias. Em hipótese alguma deve-se utilizar hastes de metal e muito menos os dedos para quebrar as pontes formadas no funil de alimentação. As hastes de metal podem atingir a rosca e danificá-las, assim seria necessário um reparo na rosca afetada. Ao se utilizar a mão para fazer a remoção mecânica pode ocorrer um acidente de trabalho caso a mão atinja a região da rosca, caso não haja nenhuma haste disponível e necessite fazer a remoção mecânica utilizando as mãos, deve-se interromper o processo desligando a extrusora para o rompimento da ponte (GILES Jr. et al., 2004).

Se a formação da ponte é um problema constante encontrado em um processo, pode-se utilizar de medidas preventivas para evitar a utilização de hastes ou remoção manual para remover mecanicamente as pontes formadas. Caso a formação da ponte ocorra devido à compressão e aderência dos materiais no funil de alimentação, pode-se utilizar um funil contendo mecanismo de rotação que age com o intuito de romper as

pontes. Também existe a possibilidade de se utilizar alimentadores individuais volumétricos ou gravimétricos que são normalmente equipados com algumas pás, brocas, paredes flexíveis ou lâminas acima da zona de alimentação da rosca para evitar a formação das pontes no funil de alimentação. Outra alternativa para prevenir a formação da ponte é a utilização do funil de alimentação proporcional (GILES Jr. et al., 2004).

Giles Jr *et al.* (2004) descrevem que o afinilamento, ou “caminho de rato”, ocorre quando o material adere na parede do funil impedindo o livre fluxo do material. A Figura 16 apresenta um desenho esquemático do afinilamento em um funil de alimentação.



Figura 16: Desenho esquemático da formação do afinilamento em um funil de alimentação.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

Esse fenômeno do afinilamento pode ocorrer com materiais compressíveis, materiais aderentes que tendem a aglomerar ou aderir às paredes do funil, materiais que não apresentam um fluxo livre ou materiais reciclados. As ações corretivas para esse fenômeno de afinilamento são semelhantes aquelas apresentadas para a eliminação da ponte. Além disso, pode-se utilizar adicionar aditivos, em pequena proporção e que não afetem as propriedades física do produto final, para aumentar a fluidez do material e eliminar o afinilamento do material no funil de alimentação (GILES Jr. et al., 2004).

O último problema apresentado por Giles Jr *et al.* (2004) é o aprisionamento seletivo (*selective entrapment*) que ocorre devido a mistura de materiais com diferente tamanho de partículas. A utilização de pellets e

pó é um exemplo de situação que pode ocorrer o aprisionamento seletivo, onde as partículas são separadas de acordo com seus respectivos tamanhos. A Figura 17 apresenta um desenho esquemático do aprisionamento seletivo.

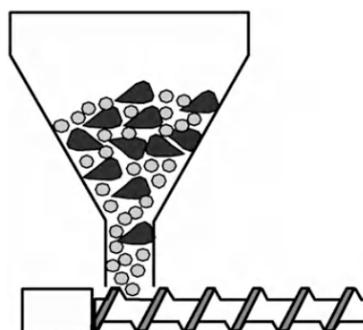


Figura 17: Desenho esquemático da formação do aprisionamento seletivo em um funil de alimentação.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

De acordo com a Figura 17, é possível identificar que a parte inferior do funil torna-se mais rica em materiais com partículas menores, enquanto a parte superior apresenta materiais com partículas maiores. Esse fenômeno pode resultar em uma concentração maior de partículas menores no início da extrusão e uma concentração maior de partículas maiores no final da extrusão. Assim haverá uma diferença na concentração dos produtos finais, mas caso o produto final da extrusão seja *pellets* não apresentará grandes problemas pois podem ser misturados posteriormente para garantir a uniformidade do produto. Entretanto caso os produtos finais sejam filmes, ou outros produtos acabados, não é possível misturar posteriormente os produtos, assim o melhor método para evitar o aprisionamento seletivo é utilizar alimentadores separados para cada tipo de matéria-prima, sendo o funil de alimentação proporcional uma alternativa. Caso não haja apenas o funil de alimentação por inundação disponível, não havendo possibilidade para o funil de alimentação proporcional, pode-se colocar material no funil de forma a cobrir apenas a região da rosca sem que haja um acúmulo de material no funil (GILES Jr. et al., 2004).

Giles Jr. *et al.* (2004) apresentam o deslizamento (*slippage*), o corte (*cutting*) e o ejeção (*ejection*) como os últimos problemas apresentados pela alimentação. Grandes partículas, lubrificantes ou líquidos podem causar o deslizamento na região de alimentação da rosca. A Figura 18 apresenta o deslizamento ocorrendo na região de alimentação causado por grandes partículas da matéria-prima.



Figura 18: Desenho esquemático do deslizamento (*slippage*) causado por grandes partículas de matéria-prima, lubrificantes ou líquidos.

Fonte: Giles Jr. *et al.*, 2004

Para solucionar esse problema, pode-se utilizar tanto a moagem das partículas grandes quanto a pulverização dos lubrificantes ou líquidos utilizados como matéria-prima. Outra alternativa para eliminar ou reduzir o deslizamento é a utilização do funil de alimentação induzida (*crammer*) ou um gargalo de alimentação que apresente ranhuras (*grooved feed throat*), pois ambos irão aumentar o atrito entre a matéria-prima e as paredes do funil de alimentação (GILES Jr. *et al.*, 2004).

O problema do corte (*cutting*) também ocorre devido a utilização de largas partículas da matéria-prima. Essas largas partículas são moídas pelo movimento do filete da rosca (*screw flight*) contra o gargalo do funil de alimentação, conforme apresentado pela Figura 19. Apesar de as matérias-primas serem moídas na região da alimentação da rosca, não há nenhuma variação na produção e não apresenta as mesmas consequências dos problemas apresentados anteriormente.

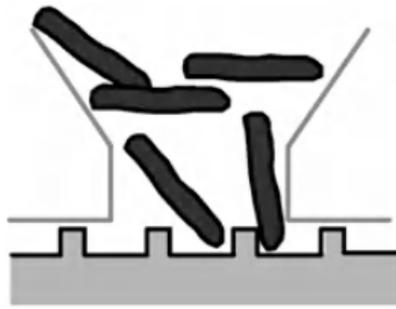


Figura 19: Desenho esquemático do corte (*cutting*) causado por grandes partículas de matéria-prima.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), o último problema apresentado na região da alimentação é a ejeção (*ejection*), que ocorre quando a matéria-prima apresenta uma característica elástica e possui grandes partículas. Assim devido ao movimento rotacional da rosca, a matéria-prima é ejetada da rosca conforme representado na Figura 20.



Figura 20: Desenho esquemático da ejeção (*ejection*) causada por grandes partículas de matéria-prima elástica.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

Giles Jr *et al.* (2004) ainda ressaltam que a temperatura na zona de alimentação da rosca é fundamental para a eficiência de alimentação na extrusora. Se a temperatura na zona de alimentação for muito alta, ocorrerá uma fusão prematura da matéria-prima produzindo um filme lubrificado nas paredes do canhão da extrusora. Assim, haverá uma redução no atrito entre as paredes do canhão da extrusora e a matéria-

prima gerando o deslizamento do polímero. Caso a temperatura na zona de alimentação seja muito baixa, o atrito do polímero com as paredes do canhão da extrusora será reduzido, resultando em um baixo transporte da matéria-prima pela rosca. Dessa forma, a temperatura ideal na zona de alimentação da rosca deverá permitir que a matéria-prima se torne mais pegajosa, gerando um alto atrito com as paredes do canhão da extrusora e auxiliando na locomoção da matéria-prima com o movimento rotacional da rosca.

3.3.2. ZONA DE FUSÃO OU PLASTIFICAÇÃO

A zona de fusão ou plastificação inicia-se a partir da distância de aproximadamente cinco ou seis vezes o diâmetro da rosca partindo do local onde o polímero é adicionado (MANRICH, 2005). Giles Jr *et al.* (2004) apresentam duas fontes de calor disponíveis para fundir o polímero, a primeira forma é o calor proveniente do aquecimento pelo cisalhamento, que é responsável por cerca de 80 a 90% do calor necessário para fundir o polímero. A segunda forma é o calor proveniente do sistema de aquecimento do canhão, responsável pelo complemento do calor fornecido pelo aquecimento pelo cisalhamento.

De acordo com Manrich (2005), o cisalhamento na extrusão pode ser originado de duas formas diferentes: a primeira ocorre devido ao movimento do material polimérico com as paredes metálicas do canhão ou da rosca, e a segunda forma é através do movimento entre as diferentes camadas do polímero que deslizam-se umas sobre as outras. Giles Jr *et al.* (2004) ressaltam que a velocidade de rotação da rosca é diretamente proporcional às taxas cisalhamento, e com o aumento da taxa de cisalhamento há uma diminuição na viscosidade do polímero, o que gera uma alta vazão do polímero. Entretanto, deve-se atentar para uma taxa de cisalhamento muito elevada, pois essa taxa muito elevada pode gerar uma degradação e/ou descoloração do polímero.

A Figura 21 apresenta um desenho esquemático para o processo de fusão na extrusora. De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), o leito plástico sólido (*plastic solid bed*) é empurrado pelo filete da rosca na zona de alimentação para a zona de transição. A medida que o polímero atinge a zona de transição, inicia-se a formação de uma fina camada de filme entre o leito plástico sólido e as paredes da extrusora.



Figura 21: Desenho esquemático para o processo de fusão da extrusora.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

Na zona de transição o polímero é compactado tanto pela pressão causada pelos sólidos quanto pelo aumento constante do diâmetro da rosca, que diminui o espaço disponível para o polímero. Na zona de compressão, parte do polímero que ainda esta na fase sólida começa a ser fundido na região de cisalhamento, que ocorre entre uma fina camada de filme líquido entre o leito plástico sólido e as paredes da extrusora. A Figura 22 apresenta o mecanismo de fusão nas diferentes zonas da rosca.

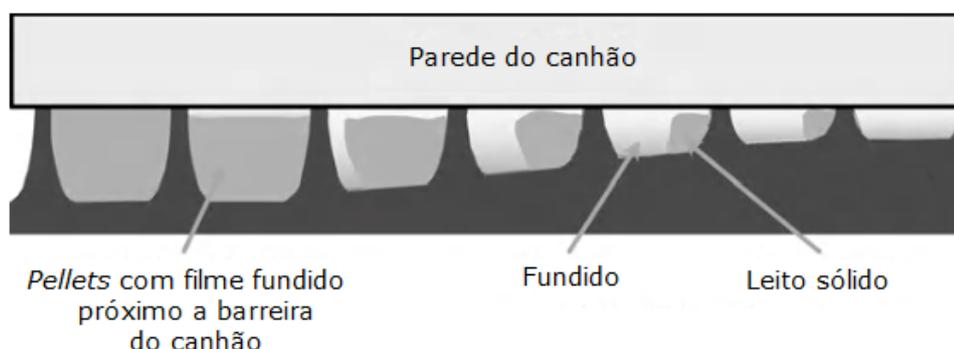


Figura 22: Desenho esquemático para o processo de fusão nas diferentes zonas da extrusora.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

De acordo com a Figura 22, é possível perceber o desenvolvimento, ao longo da rosca, do filme de polímero próximo à parede do canhão da extrusora. O desenvolvimento desse filme é acompanhado pelo tanto pelo aumento do diâmetro da rosca quanto pelo aumento da fusão do material até atingir a completa fusão do polímero. Assim, a medida que o diâmetro da rosca aumenta, a pressão sobre o polímero sólido aumenta forçando-o contra a parede do canhão da extrusora (GILES JR. et al., 2004; RAUWENDAAL et al., 2014).

O objetivo da plastificação é obter todo o polímero fundido ao fim da zona de fusão. De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), as três variáveis que afetam a taxa de fusão são: largura do leito sólido, espessura do filme formado na parede do canhão da extrusora e a temperatura do sistema de aquecimento do canhão. Para aumentar a taxa de fusão do polímero, o leito sólido deve apresentar uma superfície mais larga o possível, aumentando assim a área de contato com as paredes do canhão da extrusora que resultará em uma maior taxa de cisalhamento. A Figura 23 apresenta um desenho esquemático que compara o efeito da largura da superfície do leito sólido no processo de plastificação.

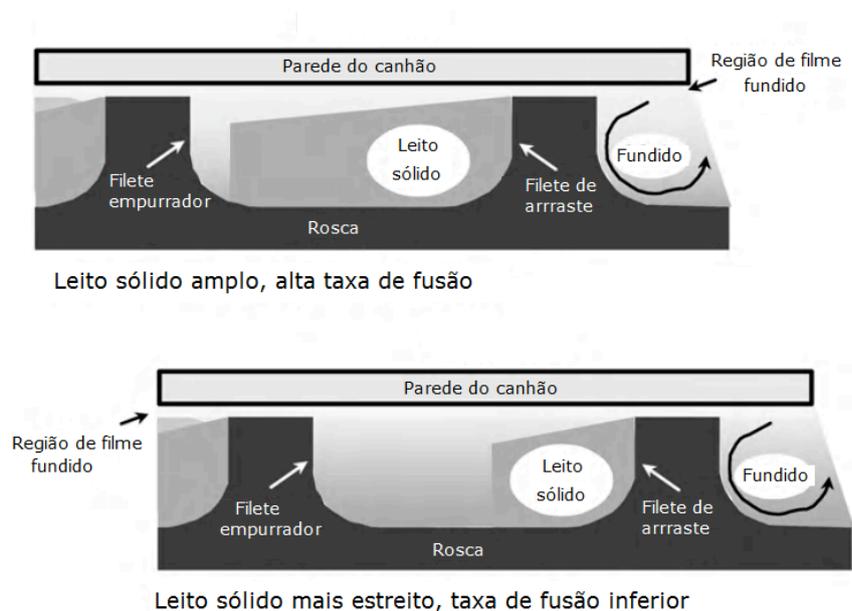


Figura 23: Desenho esquemático do efeito da largura do leito sólido no processo de plastificação.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

De acordo com a Figura 23 é possível perceber que o primeiro desenho esquemático possui o leito sólido mais amplo, apresentando uma maior taxa de cisalhamento devido a maior área e conseqüentemente uma maior taxa de fusão quando comparada a segunda situação que apresenta um leito sólido mais estreito (GILES Jr. et al., 2004).

A espessura do filme formado nas paredes do canhão da extrusora é outro fator abordado por Giles Jr *et al.* (2004). A espessura do filme determina a taxa de cisalhamento, sendo que para filmes mais finos a taxa de cisalhamento é maior gerando uma fusão mais eficiente. Tanto uma rosca quanto uma parede do canhão desgastadas podem produzir filmes com uma espessura maior, diminuindo a taxa de fusão da extrusora e conseqüentemente sua produtividade.

A terceira variável que afeta a taxa de fusão é a temperatura do sistema de aquecimento do canhão. O aumento da temperatura pode tanto aumentar a espessura do filme formado nas paredes do canhão quanto aumentar a viscosidade do polímero. Em ambos os casos haverá uma redução na capacidade de plastificação do polímero, pois tanto o aumento da espessura do filme quanto o aumento na viscosidade irão diminuir a taxa de cisalhamento, que é a principal fonte de calor para fundir o polímero (GILES JR. et al., 2004; MANRICH, 2005).

3.3.3. ZONA DE TRANSMISSÃO DA FUSÃO

A zona de transmissão da fusão considera o movimento do polímero fundido da região de transição até a matriz da extrusora. O modelo de transmissão do polímero pode ser simplificado, facilitando a compreensão, assumindo que a rosca está estacionária e o canhão está em rotação (GILES JR. et al., 2004; CANTOR, 2011). A Figura 24 apresenta o modelo de transmissão do polímero fundido.

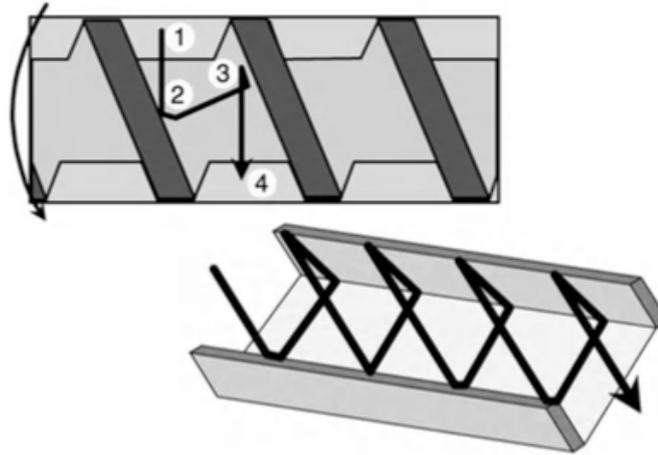


Figura 24: Desenho esquemático do modelo de transmissão do polímero fundido.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

De acordo com a Figura 24, é possível perceber o movimento do polímero ao longo da rosca, partindo da posição 1 até a posição 4. O movimento é iniciado próximo à parede do canhão, em seguida move diretamente para a parede do filete da extrusora. A medida que o canhão gira em torno da rosca, esse contato com o filete da rosca faz uma pressão sobre material para a posição 3. Com o contínuo movimento do canhão, o polímero na posição 3 é forçado à posição 4. Esse movimento espiral do material promove o cisalhamento e a mistura do material na região de compressão da rosca (GILES JR. et al., 2004; CANTOR, 2011).

Giles Jr et al. (2004) apresenta que a produção da extrusora pode ser equacionada pela soma vetorial do fluxo de arraste (*drag flow*) com o fluxo de pressão (*pressure flow*) e com o fluxo de vazamento (*leakage flow*) (GILES JR. et al., 2004). A Figura 25 apresenta o modelo para o perfil de velocidade na zona de compressão da extrusora.

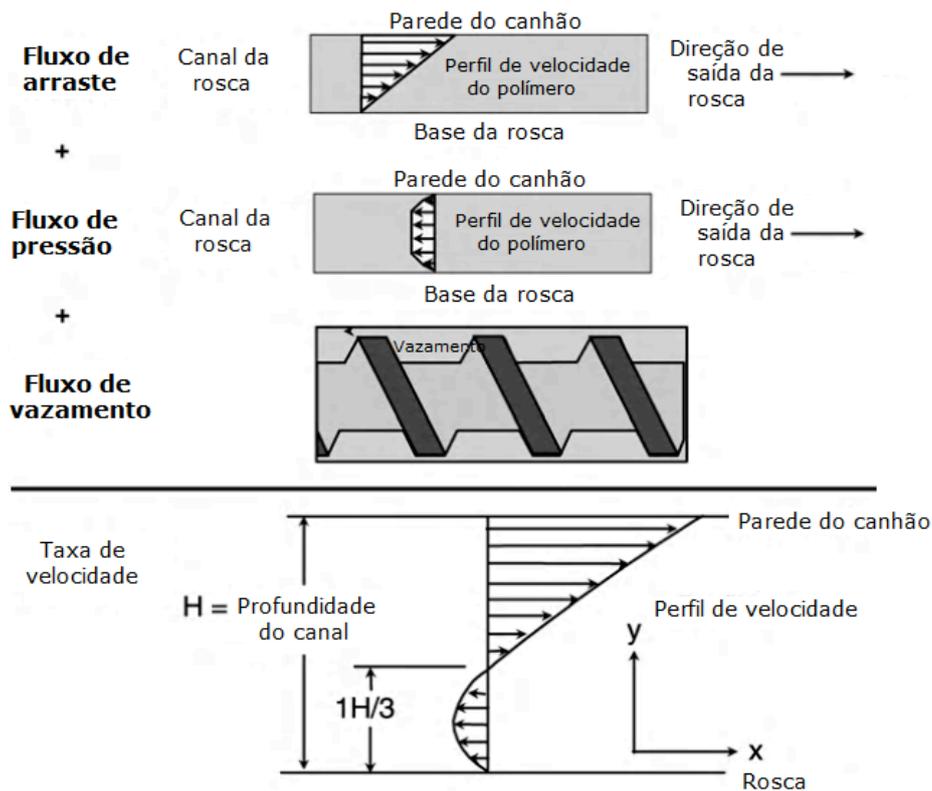


Figura 25: Desenho esquemático do modelo para o perfil de velocidade na zona de compressão da extrusora.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

O fluxo de arraste (*drag flow*) é gerado pela rotação da rosca no canhão da extrusora, sendo maior próximo a parede do canhão e decrescendo até atingir uma velocidade zero na base da rosca. O fluxo de pressão (*pressure flow*) ocorre no sentido contrário da extrusão, em direção ao gargalo de alimentação, devido à pressão que é gerado no conjunto de telas e na matriz. Esse fluxo apresenta velocidade zero tanto na parede do canhão quanto na base da rosca, o máximo de velocidade é atingido no centro da profundidade do canal (*channel depth*). O fluxo de vazamento (*leakage flow*) é o fluxo causado pelo desgaste da rosca, e pode ocorrer sobre os filetes da rosca quando estas apresentam uma "folga" maior que o normal. Para roscas que não possuem desgaste, pode-se desconsiderar esse fluxo de vazamento (GILES JR. et al., 2004).

De acordo com o gradiente de velocidade apresentado a na Figura 25, o polímero fundido apresenta uma maior velocidade próximo à parede do

canhão, enquanto o material a dois terços de profundidade do canal (H) apresenta velocidade zero. Na parte inferior até um terço do canal de profundidade (H), o polímero apresenta uma velocidade em direção ao gargalo de alimentação (GILES JR. et al., 2004).

3.3.4. ZONA DE MISTURA

O objetivo da extrusão de atingir um produto uniforme e homogêneo é dependente da zona de mistura, que é essencial até mesmo para extrusar materiais virgens. A mistura pode ser determinada pelo tempo de retenção do material na extrusora e pela taxa de cisalhamento que ocorre no fluido na zona de mistura. De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), as extrusoras monorosca que não apresentam uma zona de mistura possuem uma baixa mistura do polímero fundido. Para haver uma boa mistura, deve-se haver um movimento espiral do polímero fundido assim como uma grande variação na trajetória de cisalhamento (*shear histories*) do material.

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004) e Cantor (2011), as roscas com zona de mistura podem ser divididas em dois tipos: zona mistura distributiva (*distributive mixing*) e zona mistura dispersiva (*dispersive mixing*). A rosca com zona de mistura distributiva distribui uniformemente o material, utilizando de grandes variações do fluxo do polímero fundido, sendo muito utilizada para extrusão com fibras, reforços de carga e materiais sensíveis ao cisalhamento. A zona de mistura dispersiva quebra aglomerados do material e dispersa uniformemente o material fundido, sendo muito utilizada na mistura de plásticos, com pigmentos e aditivos como retardante de chamas, lubrificantes entre outros. A Figura 26 (a) apresenta um desenho esquemático de uma rosca com zona distributiva e (b) rosca com zona dispersiva.

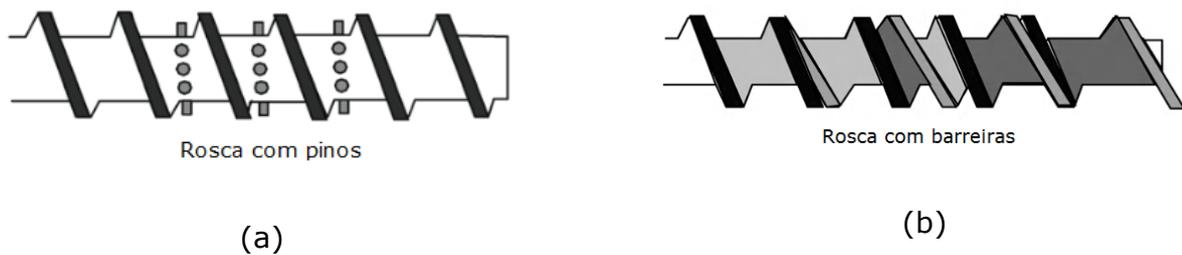


Figura 26: Desenho esquemático de uma rosca com zona distributiva e (b) rosca com zona dispersiva.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

3.3.5. ZONA DE DESVOLATILIZAÇÃO

Na zona de desvolatilização a umidade, espécies voláteis ou solventes são removidos do processo de extrusão. De acordo com Giles Jr *et al.* (2004) e Rauwendaal *et al.* (2014) apenas as extrusoras com dois estágios de rosca apresentam a região de desvolatilização que depende de uma região em que haja uma baixa pressão para que o material não seja expelido na região de ventilação (*vent*). A Figura 27 apresenta um desenho esquemático da extrusora com dois estágios de rosca.

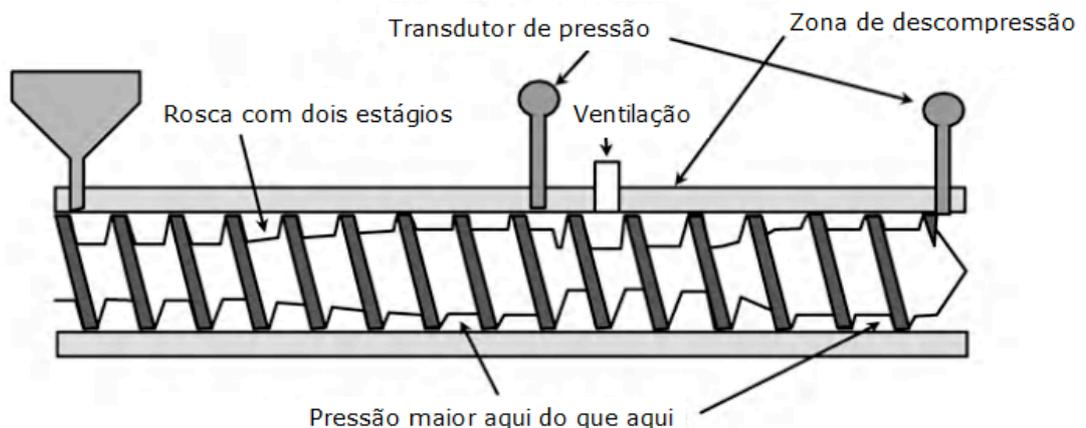


Figura 27: Desenho esquemático de uma extrusora com dois estágios de rosca.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

A primeira região da rosca é similar a uma rosca padrão em que há a região de alimentação, transição e compressão seguida de uma região de descompressão. A segunda região da extrusora apresenta uma acentuada transição para a secção final de bombeamento que bombeia o material fundido para a matriz. Essa transição deve manter a velocidade de extrusão para garantir que o material fundido na primeira região da rosca não seja acumulado na segunda região e nem seja expelido na região de ventilação (GILES JR *et al.*, 2004; RAUWENDAAL *et al.*, 2014).

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), um sistema de vácuo pode ser conectado à região de ventilação para que haja uma diminuição na pressão de vapor e assim promova uma fácil retirada das espécies voláteis e da umidade presente no material fundido. Além disso, é necessário que os polímeros sejam dessecados antes de serem adicionados a extrusora para prevenir a presença da umidade, que com o aquecimento degradará o polímero, resultando em cadeias moleculares menores e com baixas propriedades físicas.

3.3.6. ZONA DE FORMAÇÃO DO EXTRUSADO

A zona de formação do extrusado é representada pela matriz que pode ser subdividida em três zonas que produzem a secção transversal final. A primeira parte inclui tanto os conjuntos de telas quanto as placas de ruptura, nessa etapa há uma redução no movimento espiral do material, devido ao movimento da rosca. A segunda parte consiste na zona de transição ou adaptador que é responsável por alterar a secção transversal circular, proveniente da extrusora, em diferentes formatos. O material é então direcionado pelos canais de convergência para os lábios da matriz (*die lips*). A terceira parte é representada pela zona paralela da matriz (*die land*) onde o material fundido adquire sua característica final antes do material sair da matriz. Nessa região, zona paralela e lábios da matriz, há o controle do perfil (*die swell*), da pressão, e da uniformidade do fluxo (GILES JR *et al.*, 2004; RAUWENDAAL *et al.*, 2014; HARPER, 2006).

Geralmente, as dimensões do material na região dos lábios da matriz são diferentes das dimensões dos produtos devido a variações da pressão ao longo da matriz, do perfil e do polímero extraído (*draw down*). A Figura 28 apresenta um desenho esquemático para uma matriz genérica, nesta figura é possível visualizar a diferença nas dimensões entre os lábios da matriz, do perfil e do polímero extraído (*draw down*). Diferenças nas características químicas e nas propriedades reológicas irão alterar a diferença entre as dimensões do material nos lábios da matriz, no perfil assim como no polímero extraído (GILES JR. et al., 2004).

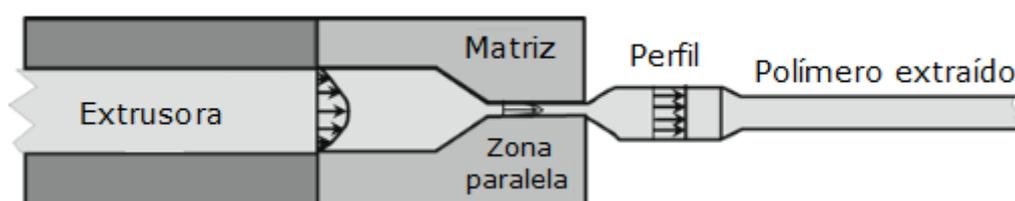


Figura 28: Desenho esquemático para uma matriz genérica.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), uma alta tensão de ruptura na matriz e uma baixa temperatura de fusão geram um perfil maior, enquanto uma zona paralela da matriz mais longa e um curto caminho de estreitamento na matriz (*reservoir land*) geram um perfil menor.

3.4. PROCESSO DE EXTRUSÃO DE FILME POR SOPRO

O processo de extrusão de filme por sopro é praticamente exclusivo de extrusoras monoroscas, sendo muito pouco comum em extrusoras rosca dupla (*twin screw extruders*). Neste processo, representado pela Figura 29, a matéria-prima fundida flui pelo cabeçote e por uma matriz circular (*annular die*), representado pela Figura 30, para formar um balão (*bubble*) que é puxado verticalmente para cima. Existem alguns poucos casos em que o balão pode ser puxado verticalmente para baixo ou mesmo

horizontalmente, para fora da matriz. O balão do polímero pode ser soprado em diferentes diâmetros e espessuras com a utilização da mesma matriz, permitindo assim uma produção de diferentes filmes (GILES Jr et al., 2004; CANTOR, 2011; HARPER, 2006).

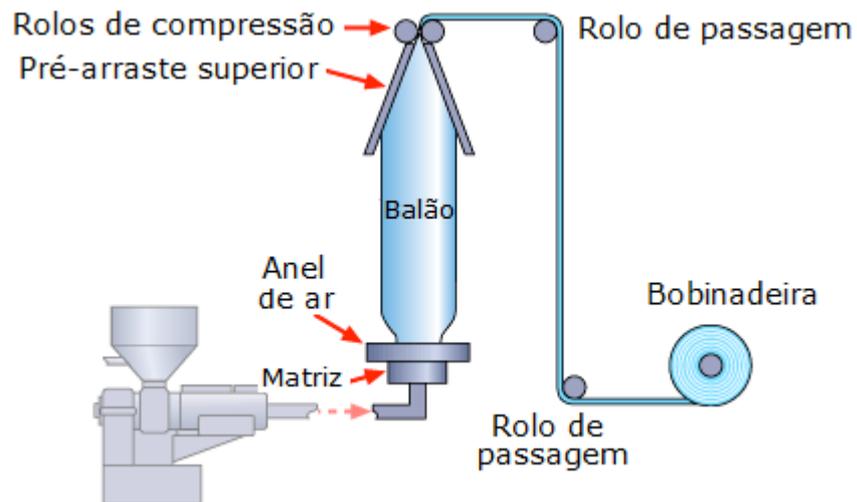


Figura 29: Desenho esquemático do processo de extrusão de filmes por sopro

Fonte: <http://pasquimico.blogspot.com.br/>

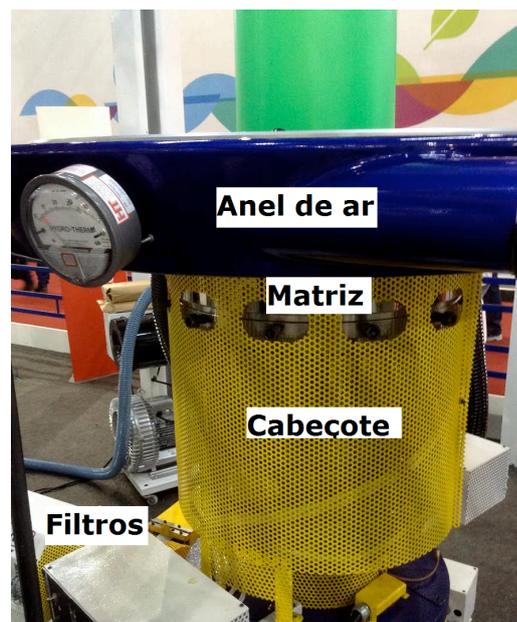


Figura 30: Matriz circular com o cabeçote para o processo de extrusão de filmes por sopro

O resfriamento do polímero é realizado por anéis de ar (*air ring*) que estão localizados na extremidade da matriz, existe ainda a possibilidade de um resfriamento interno para aumentar a taxa de resfriamento do material. A taxa de resfriamento é fundamental para determinar o fluxo de ar, a velocidade de produção do filme e a diferença de temperatura. A estabilidade do balão será crucial para o controle das medidas do filme. Após o resfriamento, o balão é direcionado para o pré-arraste superior (*Forming Tent Guide Rolls*) e em seguida para os rolos de compressão (*nip rolls*) que transformam o balão em um filme de duas camadas. Após os rolos de compressão (*nip rolls*), o filme é direcionado para por rolos puxadores (*puller rolls*) que direcionaram o filme para fora da extrusora por meio dos rolos de passagem (*idler rolls*) (GILES Jr et al., 2004; CANTOR, 2011; HARPER, 2006).

De acordo com Giles Jr et al. (2004), existem três tipos básicos de matriz para o processo de extrusão de filmes por sopro, representados pela Figura 31. O primeiro tipo é a matriz de alimentação lateral (*Side-Fed Die*) que utiliza um mandril como suporte lateral, o segundo tipo de matriz é representado pela matriz de alimentação inferior (*Bottom-Fed Die*), o terceiro tipo é representado pela matriz de alimentação helicoidal inferior (*Bottom-Fed Spiral Die*). Tanto o segundo quanto o terceiro tipo de matriz geram um produto com uma melhor distribuição e sem linhas de solda causadas pelo suporte do mandril, quando comparadas à matriz de alimentação lateral.

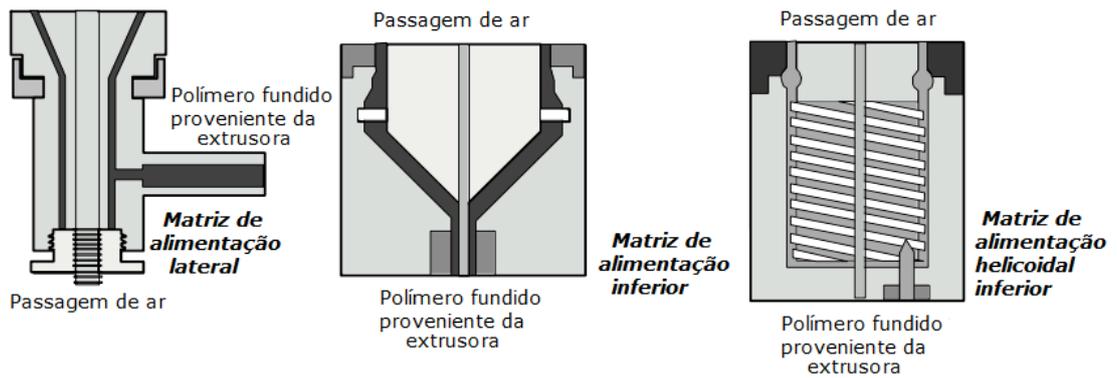


Figura 31: Desenho esquemático para os três tipos de matrizes da extrusão de filmes por sopra.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

O modelo helicoidal, último modelo apresentado na Figura 30, de matriz para a extrusão de filmes por sopra possui canais que distribuem o polímero fundido. Esses canais diminuem à medida que o polímero aproxima-se do final da matriz, aumentando progressivamente a pressão na saída da matriz. Esses canais também são responsáveis por reduzir a diferença de temperatura do polímero fundido (GILES JR. et al., 2004). A Figura 32 apresenta os componentes de uma matriz de alimentação inferior espiral para a extrusão de filmes por sopra.

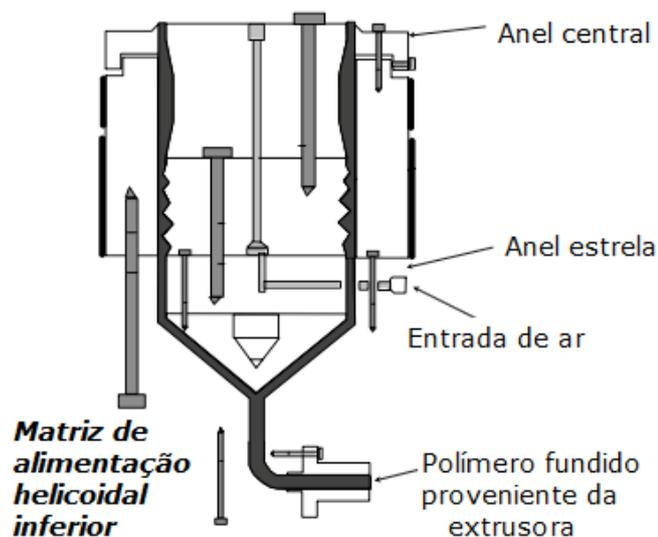
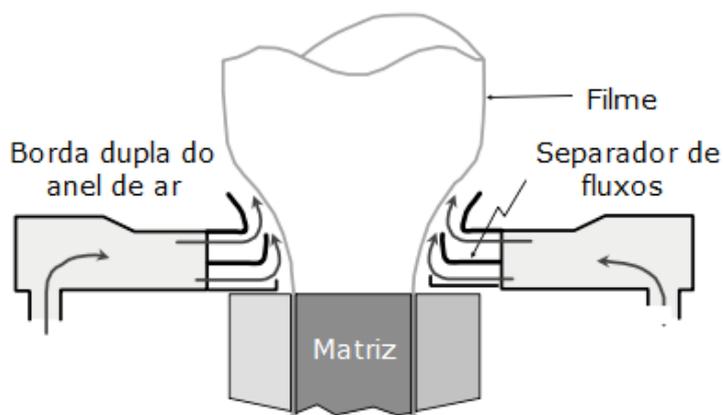


Figura 32: Desenho esquemático para a matriz de alimentação inferior espiral para a extrusão de filmes por sopra.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

O anel estrela (*spider ring*) é o local onde o ar, responsável por inflar o balão, é injetado. O anel central da matriz (*centering*) é utilizado para ajustar a diferença da matriz para manter a espessura do filme uniforme (CANTOR, 2011).

Giles Jr *et al.* (2004) e Cantor (2011) apresentam duas formas de resfriar o balão em um processo de extrusão de filmes por sopro. O primeiro é o resfriamento externo pelo anel de ar, representado pela Figura 33 (a) e (b), que é especificado pela capacidade de resfriamento, pela estabilidade do balão e uniformidade do anel de ar. Assim, as mangueiras devem estar livres de qualquer vazamento para evitar fluxos turbulentos ou instabilidades no balão.



(a)



(b)

Figura 33: Desenho esquemático (a) da matriz com resfriamento por anel de ar
(b)

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

A segunda forma de resfriar um balão em um processo de extrusão de filmes por sopro é por meio do resfriamento interno do balão associado ao resfriamento externo pelo anel de ar, conforme representado pela Figura 34 (a) e (b). Assim, o balão é resfriado tanto por fora quanto por dentro, permitindo um melhor resfriamento além de uma maior velocidade no processo de extrusão devido a uma melhor estabilidade apresentada pelo balão. O resfriamento interno reduz a temperatura interna do balão

enquanto mantém o diâmetro constante (GILES JR. et al., 2004; CANTOR, 2011).

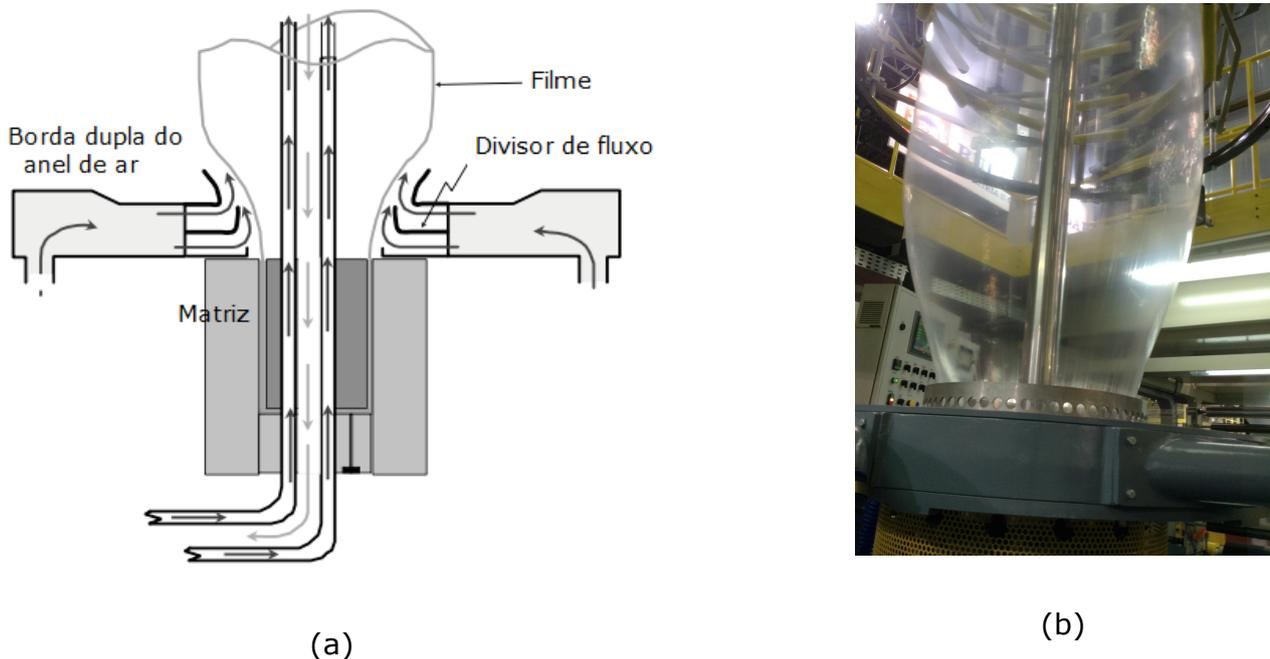


Figura 34: Desenho esquemático (a) para a matriz com resfriamento interno associado ao resfriamento externo por anel de ar (b).

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

As setas apresentadas na Figura 34 (a) mostram o fluxo do ar no resfriamento interno da matriz. O ar utilizado para o resfriamento interno segue o fluxo ascendente, enquanto o fluxo descendente representa o ar que é dispensado pela parte inferior da matriz (GILES Jr et al., 2004; CANTOR, 2011).

A torre para o processo de extrusão de filmes por sopro, representada pela Figura 35, sustenta os rolos de compressão (*nip rolls*), os rolos puxadores (*puller rolls*), o pré-arraste superior (*Forming Tent Guide Rolls*) e os estabilizadores do balão, utilizados para controlar o tamanho do balão. Além desse sustento, a torre é responsável por fornecer a distância necessária para o resfriamento e solidificação do filme. A torre deve ser construída de forma que as vibrações do processo não sejam transmitidas para o balão (GILES Jr et al., 2004; CANTOR, 2011).



Figura 35: Torre para o processo de extrusão de filmes por sopra.

Fonte: Giles Jr. et al., 2004

A armação de dobra (*Collapsing Frame*) pode ser construída de diversos materiais, mas devem ser altamente polidos e livres de fendas ou imperfeições que possam riscar o filme ou gerar qualquer tipo de defeitos. A armação de dobra é ajustável ao diâmetro do balão e deve estar alinhado com a matriz para proporcionar filmes uniformes (GILES Jr et al., 2004; CANTOR, 2011; HARPER, 2006).

Após os rolos de compressão (*nip rolls*), o filme é puxado para os rolos de passagem (*idler rolls*) para proporcionar uma tensão uniforme ao filme. Entre os rolos de compressão e as bobinadeiras (*winders*), pode haver o tratamento de corona que tem como função modificar a superfície química do filme, tornando-o mais adequado para impressão (GILES Jr et al., 2004; CANTOR, 2011).

3.5. CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO DO PEBD

De acordo com Giles Jr *et al.* (2004), as diferentes propriedades e desempenho dos diferentes tipos de polietilenos são proporcionais à densidade, que os autores relacionam com a cristalinidade do material, e a massa molecular. O polietileno, de uma forma geral, não é higroscópico e nem absorve umidade do meio. Portanto, geralmente não é necessário nenhum sistema de secagem do polímero para o processo de extrusão, a não ser que os *pellets* ou o pó do polímero tenham sido armazenados em locais inapropriados, descobertos ou frios, e tenham sido levados para serem processados em locais quentes. Nesses casos, pode ocorrer à condensação de água, proveniente da umidade, na superfície do polímero ocasionando problemas previamente citados no processo de extrusão.

Devido sua excelente estabilidade térmica, o polietileno pode ser processado sob diversas faixas de temperatura sem que haja a degradação térmica do polímero (GILES Jr. et al., 2004). De acordo com Manrich (2005), o PEBD possui uma estreita faixa de fusão sendo que o polímero funde ao redor dos 140°C. Além disso, em temperaturas próximas de 180°C, a viscosidade do polímero permite uma boa processabilidade e conformação, ideais para o processo de extrusão de filmes por sopro. A Tabela 2 apresenta as temperaturas necessárias para a extrusão do polietileno de baixa densidade (GILES Jr. et al., 2004).

Tabela 2: Temperatura de processamento para o PEBD.

Material	Rosca				Matriz, °C
	Zona 1, °C	Zona 2, °C	Zona 3, °C	Zona 4, °C	
PEBD	149 - 171	171 - 185	182 - 199	182 - 199	182 - 199

Fonte: Giles Jr et al., 2004

Essas recomendações iniciais devem ser adequadas para cada processamento em particular. Cada processo deve ser otimizado de acordo com a matéria-prima, a rosca, a taxa de produção e a extrusora utilizadas (GILES JR. et al., 2004; HARPER, 2006).

Apesar do tipo de polímero processado afetar a escolha da rosca para o processo de extrusão, Giles Jr *et al.* (2004) relata que o polietileno não requer uma rosca exclusiva para seu processamento, portanto existe uma variedade de roscas que são capazes processarem o polietileno. Entretanto, Manrich (2005) apresenta que a rosca para o processamento de polietileno deve apresentar a razão de compressão (RC) entre 3,0:1 e 4,5:1, o passo da rosca (distância entre dois filetes) deve ser constante e a profundidade do canal da rosca (distância entre o filete da rosca e a parede do canhão) deve diminuir constantemente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação aos objetivos apresentados e os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que a pesquisa sobre o processo de extrusão de filmes por sopro foi eficiente. Apesar das poucas referências disponíveis sobre o processo, pode-se realizar uma revisão onde foi discutido todos os aspectos relevantes do processo de filmes de polietileno de baixa densidade por sopro.

Vale ressaltar que o processo de extrusão é caracterizado por ser um processo contínuo no qual há a mistura de materiais que passam pelo estado viscoso durante o processo. A extrusora pode ser dividida em cinco componentes majoritários que são: sistema motor, sistema de alimentação,

sistema de rosca, canhão e aquecedores, cabeçote e matriz, e por último sistema de controle. O sistema motor é o responsável por girar a rosca a uma velocidade constante para que o polímero possa ser processado. O sistema de alimentação será responsável por fornecer ao processo toda a matéria-prima e aditivos necessários para a extrusão. Sendo o funil de alimentação por inundação o mais utilizado no processo para a deposição de matérias-primas.

O sistema de rosca, canhão e aquecedores é o local onde ocorre a fusão e mistura das matérias-primas, assim o produto extrusado é transportado para a matriz da rosca. Vale destacar que dentre as funções da rosca estão: transportar, fundir ou amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. A rosca e os aquecedores serão os responsáveis por fornecer as energias para a fusão do material, sendo que a rosca, ao girar, gera um cisalhamento no material gerando cerca de 80% da energia térmica e mecânica necessária para extrusar o PE. O restante da energia é fornecido pelos aquecedores, que também auxiliam na prevenção do sobreaquecimento e degradação do material.

A matriz e o cabeçote são partes cruciais para a extrusão. No processo de extrusão de filmes por sopro o início da matriz é representado pelo final do cabeçote. Tanto o cabeçote quanto a matriz são responsáveis por moldar o material fundido proveniente da extrusora produzindo as dimensões desejadas sob uma específica taxa de transferência. É possível encontrar uma grande variedade tanto de cabeçotes quanto de matrizes utilizados no processo de extrusão. A escolha para determinado cabeçote e matriz irá depender do processo de extrusão e do tipo de produto final a ser produzido

O sistema de controle é responsável pelo controle do processo de extrusão como um todo, sendo possível realizar alterações que irão afetar todo o processo. Para assegurar que o processo de extrusão funcione corretamente, alguns parâmetros devem ser monitorados durante todo o processo. Temperatura do canhão, carga da extrusora, velocidade da rosca, pressão e temperatura de fusão, canais de resfriamento são as variáveis que devem ser monitoradas no sistema de controle para o perfeito funcionamento da extrusora.

O processo de extrusão de filme por sopro é praticamente exclusivo de extrusoras monoroscas, e em sua maioria utilizam a matriz de alimentação helicoidal inferior. Neste processo, a matéria-prima fundida flui pelo cabeçote e por uma matriz circular para formar um balão que é puxado verticalmente para cima, na maioria dos casos. O resfriamento do polímero é realizado por anéis de ar que estão localizados na extremidade da matriz, existe ainda a possibilidade de um resfriamento interno para aumentar a taxa de resfriamento do material, e assim aumentar a produtividade do processo. A torre para o processo de extrusão de filmes por sopro sustenta os rolos de compressão, os rolos puxadores, o pré-arraste superior e os estabilizadores do balão, utilizados para controlar o tamanho do balão. Além desse sustento, a torre é responsável por fornecer a distância necessária para o resfriamento e solidificação do filme.

5. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A. C. **Planeta plástico: Tudo o que você precisa saber sobre plásticos**. 1ª ed. Porto Alegre: Editora Sagra Luzzato, 2001

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução RDC n.20/08**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **Perfil 2013: indústria brasileira de transformação de material plástico**. São Paulo, 2013.

BILLMEYER JR, F. W. **Textbook of Polymer Science**. 3ª ed. Nova York. Wiley Intescience, 1984.

CANTOR, K. **Blow Film Extrusion**. 2ª ed. Munique, Alemanha. Editora Hanser, 2011.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3ª ed. São Paulo. Artliber Editora, 2010

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; DE SANTA MARIA, L. C. *Poliétileno: principais tipos, propriedades e aplicações*. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v.13, n. 1, p.1-13, 2003

DOS SANTOS, N. A. **Obtenção de polietilenos e extrusão em filmes.** Guarulhos, SP, 2006.

GILES JR, H. F.; WAGNER JR, J. R.; MOUNT III, E. M. **Extrusion: The definitive processing guide and Handbook.** 1ª ed. Norwich, NY, 2005.

HARPER, C. A. **Handbook of Plastic Process.** Estados Unidos, 2006.

MAHDAVI, H.; NOOK, M. E. **Characterization and microstructure study of low-density polyethylene by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Temperature Rising Elution Fractionation.** Journal of Applied Polymer Science. V. 109, p. 3492-3501, 2008.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de Engenharia.** 3ª ed. São Paulo, 2003.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: Rosca Única, Extrusão & Matrizes, Injeção & Modelagem.** São Paulo, 2005.

PEACOCK, A. J. **Handbook of Polyethylene: Structures, Properties, and Applications.** Marcel Dekker, New York 2000.

PISTOR, V.; CHIESA, A.; ZATTERA, A. J. Estudo do reprocessamento de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) Reciclado por processamento de extrusão de filmes tubulares. **Polímeros.** v. 20, n. 4, p.269-274, 2010.

PIVA, A. M.; WIEBECK, H. **Reciclagem do Plástico: como fazer da reciclagem um negócio lucrativo.** São Paulo, 2004.

RAUWENDAAL, C.; GRAMANN, P. J.; DAVIS, B. A.; OSSWALD, T. A. **Polymer Extrusion.** 5ª ed. Munique, Alemanha. Editora Hanser, 2014.

SINFRÔNIO, F. S. M. **Avaliação termoanalítica da reciclagem de polietileno e polietileno tereftalato usando materiais micro e mesoporosos.** 2006. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Paraíba.

WASILKOSKI, C. M. **Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com**

a análise por impedância dielétrica. 2002. Tese (Mestrado em Engenharia setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná.

WHITE, J. L. **Principles of polymer engineering rheology.** Arkon, Ohio, EUA. Wiley Interscience, 1988.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. A. **Introduction to polymers.** 3^a ed. CRC Press, 2011.