

Júlio Harada

Extrusão de Plásticos

Tecnologias e Processamentos

Artliber
EDITORA

Sumário

Processo de Extrusão de Termoplásticos	11
1.1 – Linha de extrusão com matriz plana	13
1.2 – Extrusão com matrizes tubulares para filmes	22
1.3 – Extrusão de espumados	26
1.4 – Matriz tubular para tubos, eletrodutos e mangueiras	28
1.5 – Matriz de perfis diversos.....	32
1.6 – Matriz circular para regranulação, produção de concentrados de cores, tarugos e compósitos com roscas simples e duplas.....	34
1.7 – Matriz de furos circulares para produção de monofilamento e multifilamentos	37
1.8 – Linha de extrusão para redes e telas tubulares	38
1.9 – Linha de extrusão para produção de filmes biorientados com matrizes tubulares.....	39
1.10 – Linha de extrusão para produção de filmes e chapas biorientadas com matrizes planas	39
1.11 – Linha de extrusão para encapamento de fios e cabos	40
1.12 – Linha de extrusoras de matrizes com orifícios tubulares para peças sopradas	40
1.13 – Acessórios para moagem de material plásticos para extrusão – moinhos	42
Processamento de Extrusão	43
2.1 – Matérias-primas.....	43
2.2 – Periféricos na extrusão de plásticos	50
Componentes de uma Extrusora e seus Complementos	75
3.1 – Funil alimentador	75
3.2 – Motor elétrico	76
3.3 – Estrutura de uma máquina extrusora	77
3.4 – Canhão.....	78
3.5 – Rosca	83

3.6 – Recomendação de roscas para determinados materiais.....	90
3.7 – Dimensionamento da rosca	90
3.8 – Extrusores com devolatilizadores	92
3.9 – Desmistificação das roscas de extrusão.....	94
3.10 – Placas perfuradas (porta-telas).....	99
3.11 – Telas metálicas ou filtros.....	102
3.12 – Bombas de engrenagem	103
3.13 – Matrizes (cabeçote, mandril, feira).....	104
Extrusão para Produção de Chapas, Bobinas e Filmes Através de Matrizes Planas.....	107
4.1 – Coextrusão	109
4.2 – Calandras, rolos de resfriamento e acabamento	116
4.3 – Sistemas de montagem das calandras e/ou rolos de resfriamento	125
4.4 – Rolos puxadores e embobinadores	127
Aspectos Teóricos e Operacionais da Extrusão	129
5.1 – Teoria adiabática	129
5.2 – Teoria isotérmica.....	129
5.3 – Equações de produção	131
5.4 – Simplificação das equações de fluxo.....	133
5.5 – Fatores que afetam a produção	138
5.6 – Variáveis de controle operacionais na extrusora.....	140
Problemas e Soluções para Chapas e Bobinas Produzidas Através de Matriz Plana.....	145
6.1 – Variações na espessura e largura	145
6.2 – Fluxo no desgaseificador	148
6.3 – Imperfeições na superfície da chapa	149
6.4 – Linhas na direção da extrusão	151
6.5 – Linhas perpendiculares à direção da extrusão	152
6.6 – Linhas parabólicas na direção da extrusão.....	152
6.7 – Superfície áspera	154
6.8 – Manchas opacas na chapa.....	155
6.9 – Chapa sem brilho	155
6.10 – Dobras na chapa	156
6.11 – Orientação excessiva.....	157

Extrusão de Filmes Flexíveis –Matriz Plana e Matriz Tubular	159
7.1 – Processo de extrusão de matriz plana: <i>cast film</i> e <i>extrusion coating</i>	159
7.2 – Processo tubular de extrusão	161
Variáveis Operacionais do Processo Tubular de Extrusão de Filmes:	
PEBD, PEAD, PP	171
8.1 – PEBD – Polietileno de Baixa Densidade	171
8.2 – PELBD – Polietileno Linear de Baixa Densidade.....	175
8.3 – PEAD – Polietileno de alta densidade	177
8.4 – PP – Polipropileno.....	182
Aspectos Operacionais Resumidos para Extrusão de Filmes Soprados em Geral –	
Qualidade, Problemas, Causas e Ações Corretivas	189
9.1 – Recomendações gerais para produção de um filme de matriz tubular (soprado).....	189
9.2 – Recomendações para um filme de matriz plana:.....	190
9.3 – Qualidade: problemas, causas e ações corretivas	190
9.4 – Má aparência do filme.....	195
9.5 – Baixa produtividade	196
9.6 – Variação de espessura.....	196
9.7 – Instabilidade do balão	198
9.8 – Propriedades ópticas (brilho/transparência).....	199
9.9 – Fratura do fundido (casca de laranja, pele de tubarão)	199
9.10 – Bloqueio	200
9.11 – Rugas.....	200
9.12 – Vincos/dobras	202
9.13 – Planicidade irregular do filme	202
9.14 – Pulsação no balão	203
9.15 – Baixa resistência ao impacto	203
9.16 – Dificuldade de impressão	204
9.17 – Soldabilidade insuficiente.....	204
9.18 – Amperagem alta no motor e/ou pressão excessiva na rosca	205
9.19 – Linhas ou faixas na superfície do filme colorido (pigmentado)	205
9.20 – Microfuros – Rompimento do balão, filme colorido.....	205
9.21 – Material queimado no filme	205
9.22 – Falta de cobertura ou variação de cor (pigmentado)	206
9.23 – Recomendações gerais para um filme de matriz plana	206

Extrusão de Filmes, Laminados e Chapas de PVC	209
10.1 – Aditivos.....	210
10.2 – Formulações de PVC	211
Resinas de Poliamidas para Extrusão de Filmes Especiais	213
11.1 – Química e propriedades das resinas de poliamidas	213
11.2 – Processamento de filmes de poliamidas.....	215
11.3 – Propriedades dos filmes de poliamidas	221
11.4 – Poliamidas em filmes multicamadas	222
11.5 – Aplicações	223
Materiais Olefínicos mais Utilizados na Produção de Filmes Flexíveis	225
12.1 – Polietilenos	225
12.2 – Polipropileno (PP)	237
Outros Materiais Plásticos mais Utilizados na Produção de Filmes Flexíveis	
Orientados	257
13.1 – BOPET – Politereftalato de etileno biorientado	257
13.2 – BOPS – Poliestireno biorientado.....	257
13.3 – BOPVC – PVC biorientado.....	258
13.4 – BOPA – Poliamida biorientada.....	258
Extrusão de Tubos, Mangueiras e Canudos	259
Extrusão de Perfis.....	265
Extrusão de Plásticos de Engenharia	269
16.1 – ABS – Acrilonitrila/butadieno/estireno	269
16.2 – Policarbonato (PC)	274
16.3 – PPE modificado.....	278
16.4 – Poli (tereftalato de etileno) PET e copoliésteres (copolímeros de PET)	281
Problemas em Tubos e Mangueiras, suas Possíveis Causas e Soluções	287
Extrusão para Revestimento de Fios e Cabos.....	291
18.1 – Introdução.....	291
18.2 – Reologia de polímeros fundidos na extrusão de fios e cabos	293
18.3 – Constituição, materiais e tipos de fios e cabos para condução.....	297
18.4 – Processamento por extrusão para fios e cabos.....	304

18.5 – Componentes do cabeçote para extrusão de fios e cabos	314
18.6 – Colar de fechamento entre camisa e cabeçote de extrusão.....	327
Extrusão de Monofilamentos e Multifilamentos.....	331
19.1 – Introdução.....	331
19.2 – Tipos de equipamentos disponíveis no mercado.....	331
19.3 – Sistema de produção de tiras, fitilhos, faixas, entre outras aplicações de PP, pelo sistema de extrusão.....	333
Processamento de Ráfia	335
20.1 – Aplicações	336
20.2 – Forma física dos fios.....	337
20.3 – Vantagens de tecelagem de fitas de polipropileno (PP)	337
20.4 – Polímeros	339
20.5 – Características do polipropileno para a produção de fitas de rafia.....	341
20.6 – Fabricação de fitas para tecelagem	343
20.7 – Extrusão	344
20.8 – Filmes planos.....	345
20.9 – Resfriamento.....	345
20.10 – Filmes tubulares.....	347
20.11 – Propriedades.....	354
20.12 – Reciclagem das fitas de rafia	363
Estudo Estratégico e Analítico para Instalação de uma Fábrica de Forros e Acabamentos de PVC	367
21.1 – Orientação para pesquisa de mercado.....	367
21.2 – Previsão de investimento em ativo fixo	368
21.3 – Conjunto para extrusão, perfis/forros 200 mm.....	368
21.4 – Conjunto para extrusão de forro 100 mm e arremates	371
Referências.....	377
Autores	381

No gráfico da Figura 2.56 é possível observar a variação do tempo de secagem conforme o tamanho dos grãos.

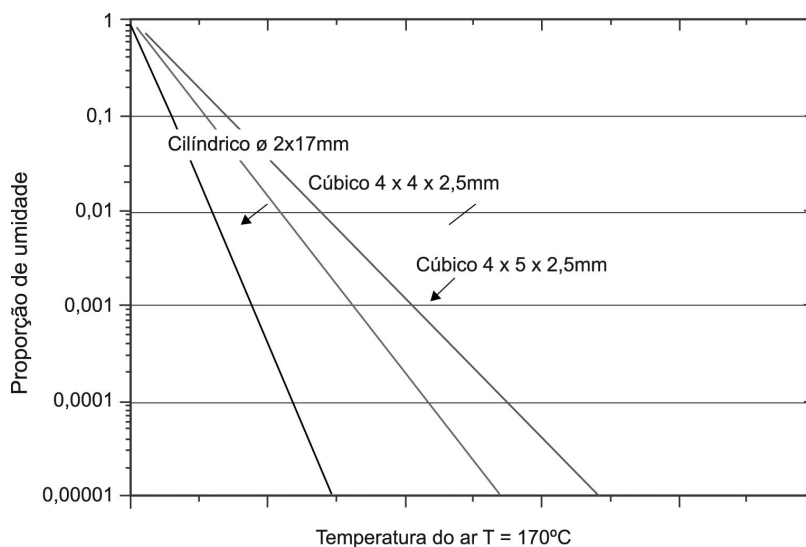


Figura 2.56– Variação do tempo de secagem conforme o tamanho dos grãos

Na Figura 2.57 pode-se ver o efeito da umidade residual na resina em relação ao ponto de orvalho (*dew point*).

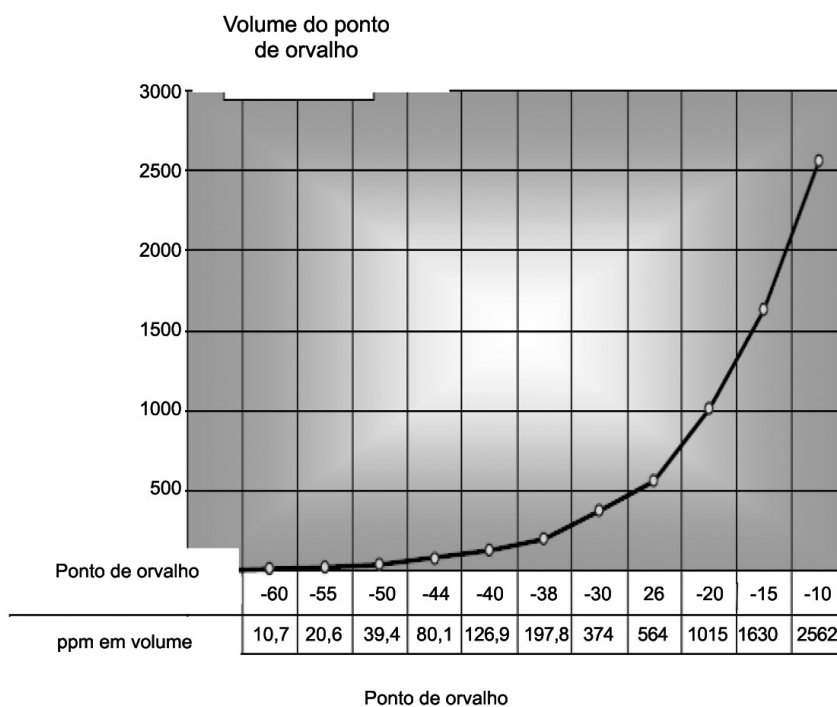


Figura 2.57 – Exemplo da umidade residual na resina em relação ao ponto de orvalho

Na Tabela 2.3, são apresentados exemplos do nível máximo de umidade residual admitida para o correto processamento para cada tipo de matéria-prima.

Tabela 2.3 – Nível máximo de umidade residual admitida de alguns materiais para o correto processamento da respectiva matéria-prima

Material	Umidade residual máxima
CA (Acetato de celulose)	0,02%
Náilon (PA)	0,02 – 0,08%
ABS	0,05%
Policarbonato (PC)	0,02%
PC para <i>compact disc</i>	0,01%
PET (injeção)	0,02%
PET (garrafa/fibra)	0,003%
Acrílico (PMMA)	0,02%
SAN	0,02%
PEEK	0,05%
PE+40% <i>carbon black</i>	0,01%
PETG	0,01%

2.2.9 - Escolha da capacidade do funil secador para o aquecimento do material

Em instalações com diversos funis secadores deve ser aplicada fórmula a seguir para cada funil (também válida para um só funil). A capacidade resultante deve ser arredondada para cima até o próximo patamar de aquecimento.

Admitir 40 °C como a temperatura inicial do funil secador.

$$P = \frac{V \cdot \Delta T}{2500}$$

P = capacidade de aquecimento [kW]
V = quantidade de ar [m³/h]
ΔT = incremento de temperatura [°C]

Como fórmula geral, pode-se considerar, nos casos de instalações com diversos funis, aproximadamente 1,5 kW por 100 litros de volume do funil (PE, PP, PS, PVC).

Excluem-se os materiais higroscópicos (PA, PEEK, PET, PPS, PBT, PSU, POM, PC e outros). Nesse caso, deve-se instalar uma capacidade de aquecimento maior.

2.2.9.1 – Cálculo do volume do funil

O volume do funil pode ser calculado usando a seguinte fórmula:

$$V = \frac{M \cdot T}{\rho}$$

V = volume do funil

M = volume do material processado em kg/h

ρ = peso específico aparente do material

T = tempo de residência

2.2.9.2 - Tempo de secagem/tempo de espera

Para granulados higroscópicos, a observação do tempo de residência é um fator essencial. Os dados e diagramas de secagem e as recomendações do fabricante do granulado devem ser conhecidas para que se possa determinar o volume do silo e ter um material isento de umidade.

Além da observação da temperatura e do ponto de orvalho, o tempo de residência não deve ser inferior nem superior ao recomendado. Tempos de espera excessivamente longos aumentam a viscosidade, por exemplo, no PA. Também podem ocorrer problemas como descoloração e outros defeitos.

Densidade aparente (esta depende da granulometria dos materiais) é diferente da densidade dos materiais. A massa específica (densidade aparente) colocado na Tabela 2.4 leva em consideração materiais virgens, ou seja, a granulometria fornecida pelos fabricantes da matéria-prima.

Válida para granulado de plástico com tamanho de grão entre 3 e 5 mm (diâmetro e comprimento).

Na Tabela 2.4 e a Tabela 2.5, são apresentados dados importantes para o devido cálculo do dimensionamento para um funil de alimentação.

Tabela 2.4 – Valores de orientação para dimensionamento de um funil de alimentação

Polímero	Símbolo	Temp. sec °C[*]	Tempo permanência [h]	Massa específico [kg/L]	Volume de ar [m ³ /kg]
Acrilonitrila-butadieno-estireno	ABS	80	2,5	0,63	1,58
Acrilonitrila-estireno-éster acrílico	ASA	80	3	0,66	1,47
Acetato de celulose	CA	60	2,5	0,78	1,92
Acetato butirato de celulose	CAB	60	2,5	0,71	1,70
Propionato de celulose	CP	70	2,5	0,74	1,92
Copolímero de acetato de vinila	EVA	80	2,5	0,57	2,60
Polímero de cristal líquido	LCP	155	4	0,83	1,63
Poliamida 11	PA 11	75	3,5	0,62	1,43
Poliamida 12	PA 12	75	3,5	0,62	1,81

Polímero	Símbolo	Temp. sec °C[*]	Tempo permanência [h]	Massa específico [kg/L]	Volume de ar [m ³ /kg]
Poliamida 6	PA 6	80	3,5	0,68	1,92
Poliamida 6.10	PA 6.10	80	3,5	0,65	1,92
Poliamida 6.6	PA 6.6	80	3,5	0,68	1,92
Poliamida 6.6 com 30% fibra de vidro	PA 6.6 GF 35	80	3,5	0,85	1,58
Policetona	PK	160	4	0,78	1,71
Poli (tereftalato de butileno)	PBT	120	3	0,81	1,72
Policarbonato	PC	120	2,5	0,72	1,34
Poli(ciclo hexano dimetil tereftalato) + glicol (copolímero)	PCTG	75	6	0,74	1,53
Poli(éter-éter-cetona)	PEEK	150	4	0,79	2,52
Poli(éter-éter-cetona) com 30% de fibra de vidro	PEEK GF30	150	4	0,89	2,00
Polietileno	PE	90	3	0,57	2,15
Polietileno de alta densidade	PEAD	90	3	0,58	2,15
Poli(éter-imida)	PEI	150	3,5	0,76	1,40
Polietileno de baixa densidade	PEBD	80	3	0,55	2,15
Polietileno de baixa densidade linear	PEBDL	90	3	0,55	2,15
Poli (éter sulfona)	PES	150	3,5	0,82	1,63
Poli (éter sulfona) com 30% de fibra de vidro	PES GF30	150	3,5	0,82	1,46
Poli (tereftalato de etileno)	PET	125	3	0,84	1,72
Poli (tereftalato de etileno) amorfo	PET-A	170	6	0,84	2,13
Poli (tereftalato de etileno) glicol	PET-G	65	4	0,76	1,36
Poli (metacrilato de metila)	PMMA	80	3,5	0,71	1,66
Poli (óxido de metileno)	POM	100	2,5	0,85	1,66
Polipropileno	PP	90	3	0,54	1,92
Polipropileno com 20% fibra de vidro	PP GF20	90	3	0,63	1,73
Polipropileno com 30% fibra de vidro	PP GF30	90	3	0,68	1,59
Polipropileno com 40% carga mineral	PP M40	90	3	0,73	1,57
Poliftalamida	PPA	80	15	0,69	1,58

Na Tabela 3.1, apresenta-se a entalpia típica de alguns polímeros para cálculo da potência necessária ao aquecimento.

Tabela 3.1 – Entalpia típica de alguns polímeros

Material	Cal/g ou BTu/lb necessária para temperatura de moldagem	
	BTu/lb	Cal/g
ABS	140 – 170	75 – 95
Acetal	180	100
Acrílico	125	70
Acetato de celulose	125	70
Náilon	275 – 325	155 – 180
Polietileno de alta densidade	250 – 300	140 – 165
Polipropileno	250	140
Poliestireno	120	65
PVC	70 – 150	40 – 85
SAN	120 – 150	65 – 85

3.4.3 - Dados técnicos do canhão (cilindro de aquecimento)

O canhão de uma extrusora deve ser facilmente desmontável, de forma a permitir a limpeza frequente tanto da rosca quanto do canhão, em particular nas máquinas pequenas, que muitas vezes trabalham com vários tipos de materiais. Ao redor do sistema de aquecimento e resfriamento deve haver um isolamento térmico, para limitar as trocas de calor com o meio exterior, permitindo uma regulação de temperatura mais precisa e independente da temperatura externa.

A relação entre o comprimento do canhão, desde o orifício de alimentação até a sua extremidade, e o seu diâmetro interno é uma característica muito importante em uma extrusora, pois ela determina a área de superfície interna do canhão disponível para a mistura, cisalhamento e aquecimento do material. A tendência atual é de se construir máquinas com um alto valor da relação comprimento/diâmetro. Esse valor é expresso na literatura técnica como L/D, sendo L o comprimento e D o diâmetro interno.

Nas extrusoras mais antigas é comum encontrar relações de 16:1 até 20:1, e nas mais modernas de 24:1, ou até 33:1, como mostrado na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Diferentes tipos de canhão para extrusora

Na Tabela 3.2, é apresentada uma relação da capacidade de produção (kg/h) em relação ao diâmetro interno do canhão (mm). Esses valores são aproximados, pois dependem de outras variáveis e da tecnologia empregada na construção da rosca e da capacidade térmica de suas resistências.

Tabela 3.2 – Capacidade de produção em relação ao diâmetro

Diâmetro (mm)	Capacidade (kg/h)
50	40 – 50
75	100 – 150
100	200 – 300
150	350 – 750
200	+750

3.5 – Rosca

A rosca é acionada diretamente dentro do canhão e presa por dispositivos, como chavetas, encaixes tipo macho-fêmea. Todos eles consideram sempre a facilidade para desmontagem.

A evolução das matérias-primas influenciou fortemente a geometria das roscas para a plastificação. De modo geral, para obter melhores condições e produtividade, é necessário dispor de uma rosca especial para cada tipo de material. É possível trabalhar com apenas um tipo de rosca para qualquer material, mas certamente comprometendo a produtividade (kg/h) e a qualidade do produto.

As roscas normalmente são divididas em seções para uma melhor plastificação do fundido:

- zona de alimentação;
- zona de compressão;
- zona de plastificação ou dosagem, e;
- zona de mistura.

A quarta zona normalmente é modificada para aumentar a área de plastificação e sua capacidade produtiva, ou seja, a zona de bombeamento do material plastificado para a parte da frente da extrusora, como mostrado nas Figuras 3.19 e 3.20.

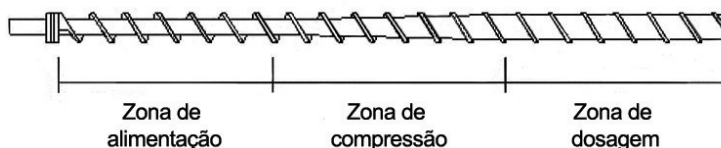


Figura 3.19 – Partes de uma rosca de plastificação de um estágio de uma extrusora

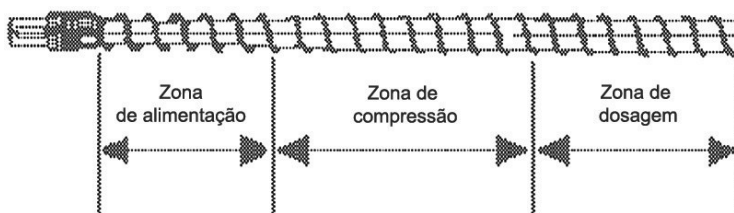


Figura 3.20 – Partes de uma rosca de plastificação de um estágio para uma extrusora sem a zona de mistura

Normalmente, é necessário prever espaços entre as máquinas para melhor circulação de ar, evitando aquecimento excessivo, além de espaço suficiente para remoção da rosca para limpeza.

Podem-se instalar as coextrusoras sem remover a extrusora principal, com pequenas adaptações. Deve-se lembrar sempre que cada controle de espessura da camada é puramente uma combinação da produção de cada extrusora. Assim, um controle metucioso de rotação e temperatura de plastificação será muito importante.

4.1.9 - Pulsação na coextrusão

É sempre desejável manter uma distância mínima entre as extrusoras para redução da perda de pressão e problemas de limpeza. Uma das melhores condições é aquela em que a camada externa tem alta pressão na entrada.

O controle de temperatura é essencial, porque a temperatura de plastificação no adaptador da coextrusora é bastante crítica.

4.2 - Calandras, rolos de resfriamento e acabamento

Após a extrusão, os materiais precisam tomar a forma final de seus propósitos, como chapas, filmes, perfis e tubos, sendo necessário resfriá-los em condições propícias para se ter produtos com qualidade e de menor custo. É o caso do uso de rolos de resfriamento e acabamento, que normalmente chamamos de calandras ou também de *chill roll*. Nas calandras, as velocidades dos rolos podem ser diferentes, já nos rolos de resfriamento as velocidades são sempre iguais.

As calandras ou os rolos de resfriamento têm as funções de resfriar, dar acabamento e traicionar o material para que não fique parado após a saída da matriz, sob condições controladas de velocidade, temperatura e de pressão, garantindo contato uniforme entre o material e a superfície dos rolos de calandragem ou resfriamento. Normalmente, o acabamento das calandras e/ou rolos de resfriamento é espelhado e inclui três rolos na extrusão. Mas há casos diferentes. Por exemplo, quando se quer produzir uma chapa plástica com certo grau de rugosidade, como painéis de veículos termoformados, chapas de box de banheiros, alguns tipos de pisos, um dos rolos da calandra ou rolo de resfriamento tem a gravação para dar o grau de acabamento que não seja o liso brilhante.

Existe também outro detalhe nas condições de pressão e temperatura dos rolos: por onde a chapa ou filme entra em contato com os rolos. Na Figura 4.16 mostra-se a entrada por cima

(a) e por baixo (b), para que se obtenha brilho na chapa. O brilho na chapa ou filme depende também do tipo de material que está sendo extrudado, se é um polímero amorfo ou um polímero semicristalino e da temperatura do rolo.

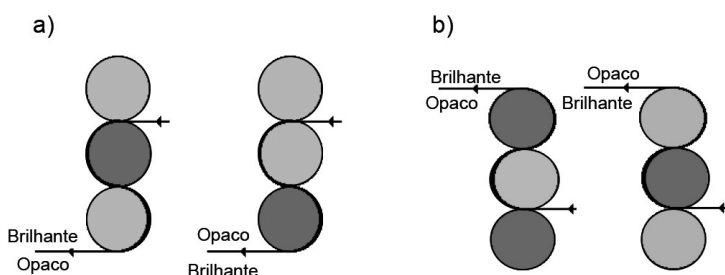


Figura 4.16 – Entrada de material por cima (a) e por baixo (b)

A Figura 4.17 mostra a transição do material do estado pastoso para sólido, que chamamos de cortina do fundido. Na prática, trata-se do cordão, pois conforme o seu tamanho, teremos acabamentos e propriedades diferentes do material extrudado, calandrado e resfriado.

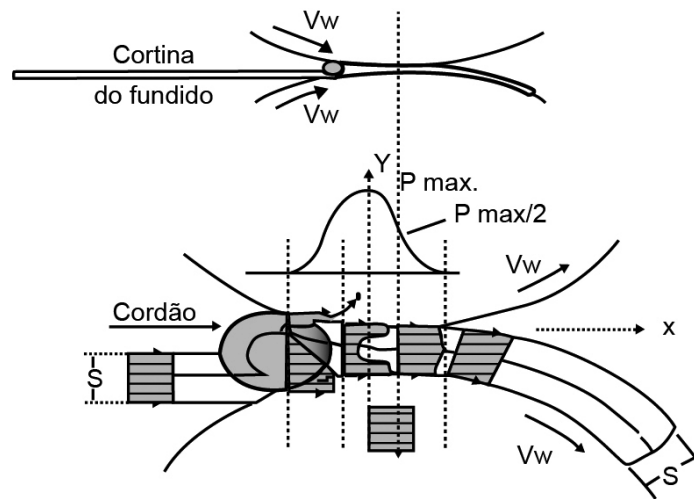


Figura 4.17 – Transição do material do estado pastoso para o estado sólido (cortina do fundido ou cordão)

4.2.1 - Cálculo para refrigeração dos rolos de resfriamento

É muito importante que a espessura da chapa/bobina/filme seja a mais uniforme possível e o sistema de refrigeração dos rolos corretamente projetado e dimensionado. As equações matemáticas a seguir podem determinar o calor a ser extraído pelos rolos de resfriamento por hora (I) e a quantidade de água para refrigeração requerida por hora para dissipação do calor (II).

$$Q_c = m \times a \quad (I)$$

Q_c = Calor a ser extraído pelos rolos de resfriamento por hora

m = Peso do material plástico extrudado por hora sobre os rolos de resfriamento (g)

a = Calor total aproximado na temperatura da chapa (cal/g) (Tabela 4.1)

$$Q = K m_2 (T_3 - T_4) \quad (II)$$

Q = Taxa de extração do calor (cal/g)

m_2 = Peso de água passando através dos rolos (g/h)

T_3 = Temperatura de saída da água (°C)

T_4 = Temperatura de entrada da água (°C)

K = Constante que permite uma eficiente transferência de calor

Para um eficiente resfriamento $Q_c = Q$, assim:

$$m \cdot a = m_2 K (T_3 - T_4) \rightarrow m_2 = (m \cdot a) / (K T_3 - T_4)$$

Tabela 4.1 – Entalpia típica de alguns polímeros

Material	Cal/g aproximado na temperatura de moldagem (a)	
	BTu/lb	Cal/g
ABS	140 – 170	75 – 95
Acetal	180	100
Acrílico	125	70
Acetato de celulose	125	70
Náilon	275 – 325	155 – 180
Polietileno de alta densidade	250 – 300	140 – 165
Polipropileno	250	140
Poliestireno	120	65
PVC	70 – 150	40 – 85
SAN	120 – 150	65 – 85

Outra propriedade importante é a condutividade térmica dos polímeros. Os polímeros possuem baixa condutividade térmica, entre 0,3 e 0,5 W/mK. A dos metais é da ordem de 100 W/mK.

Essa característica faz com que a troca de calor entre o polímero fundido e a superfície do rolo seja lenta, bem como a transferência de calor do canhão para o volume do material polimérico, necessitando de auxílio do cisalhamento gerado pela rotação da rosca plastificadora para melhorar a homogeneização da temperatura na massa a ser extrudada.

A Figura 4.18 mostra a variação da entalpia específica de alguns polímeros comerciais em razão da temperatura.

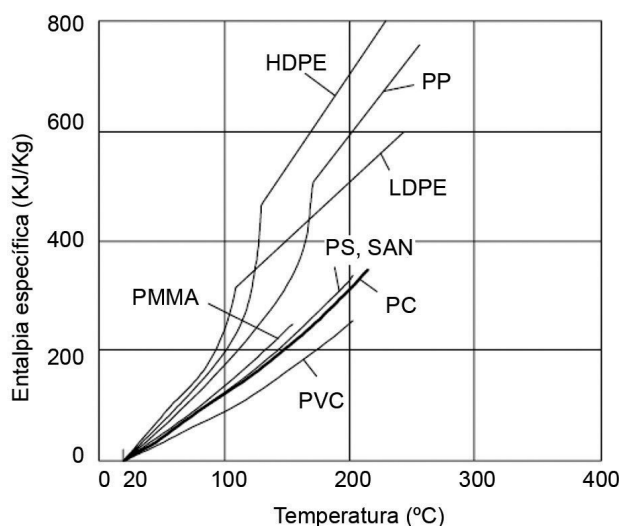


Figura 4.18 – Variação da entalpia específica de alguns polímeros comerciais em razão da temperatura

5.4 - Simplificação das equações de fluxo

5.4.1 - Abordagem prática das equações para extrusão

Podemos escrever a equação (IV) da produção da extrusora de uma forma mais simples:

$$Q = AN - \frac{B \cdot \Delta P}{\mu} \quad (V)$$

Nessa forma simplificada, os termos A e B representam constantes que só dependem da geometria da rosca. Se construirmos um gráfico da produção em função da pressão na matriz, obteremos retas, como mostrado na Figura 5.5.

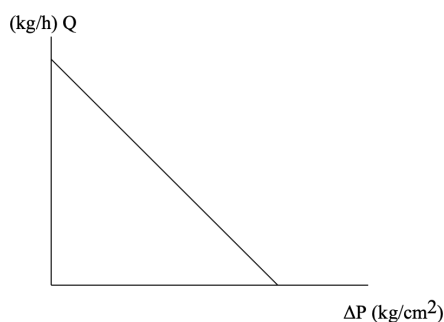


Figura 5.5 – Gráfico característico da rosca

Na Figura 5.6 estão representadas as linhas correspondentes a dois tipos de roscas: canais rasos e canais profundos. Cada linha pode ser entendida como sendo usada para a mesma rosca com várias matrizes diferentes.

Para a construção experimental dessa linha, pode-se usar uma matriz com abertura (orifício) variável. À medida que se reduz o orifício, aumenta-se a pressão, diminuindo conseqüentemente a produção da extrusora. A reta resultante é denominada linha característica da rosca.

A linha 1 representa uma rosca com filetes maiores, ou canais mais profundos, e a linha 2, uma rosca com filetes menores, ou canais mais rasos, ou a mesma rosca com abertura de matriz diferente. Observa-se imediatamente que a linha 1 é capaz de produções maiores.

No entanto, pode-se deduzir também que uma redução da pressão (causada, por exemplo, por um entupimento de telas) trará uma perda de produção maior na mesma rosca 1. Isso equivale a dizer que roscas com canais profundos são bem sensíveis a variações nas pressões. Por esse motivo, não são muito usadas onde se requer que a pressão de operação mude frequentemente, ou seja, muito alta. Nas equações das matrizes, K é uma constante característica da matriz considerada e ΔP é a queda da pressão.

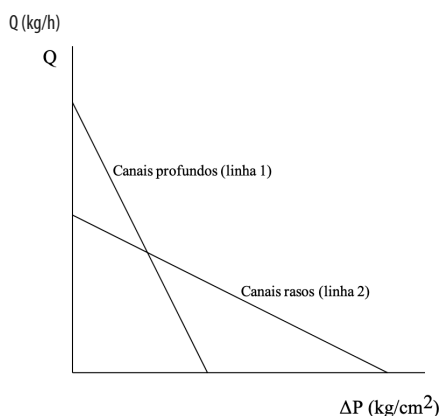


Figura 5.6 – Perda de produção conforme aumenta a pressão para duas roscas com profundidades de filetes diferentes

A Figura 5.7 mostra o gráfico característico da vazão de uma matriz, mostrando a matriz mais aberta (matriz 1) e a matriz mais fechada (matriz 2).

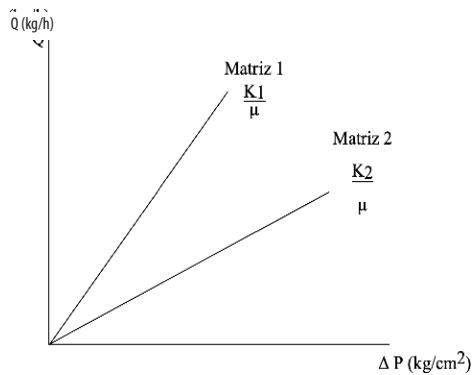


Figura 5.7 – Gráfico característico da matriz (mais aberta ou mais fechada)

Se representarmos a equação (VI) em gráficos semelhantes aos da rosca, obteremos retas, como na Figura 5.8 (tracejadas) denominadas linhas características da matriz.

A interseção de cada característica de matriz determina um ponto de operação. Assim, temos:

- Ponto A = operação com rosca 2 e matriz 1
- Ponto B = operação com rosca 1 e matriz 1
- Ponto C = operação com rosca 2 e matriz 2
- Ponto D = operação com rosca 1 e matriz 2

Por exemplo: Se tivermos a matriz 1, ela resultará em maior produção com a rosca 1. Já se a matriz dada for a 2, ela resultará em maior produção quando ela trabalhar com a rosca 2.

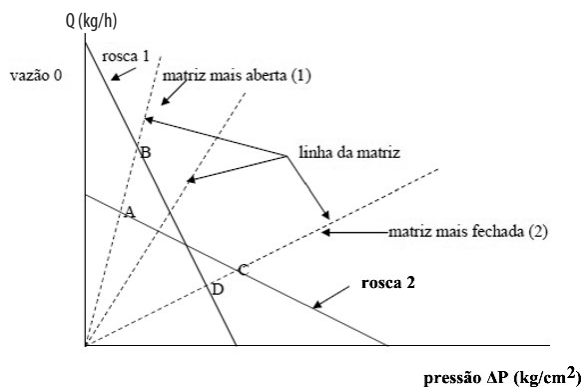


Figura 5.8 – Características da rosca e matriz combinadas

5.4.2 - Abordagem prática da equação da vazão da matriz

Assim como o extrusor tem uma equação (IV) que estabelece sua produção em função da geometria da rosca, do número de rotações por minuto e das propriedades do material, também as matrizes terão suas equações características. A dificuldade aqui é bem maior, pois cada tipo de matriz terá a sua própria equação. Toda matriz deve satisfazer os seguintes princípios:

- A queda de pressão (ΔP) deve ser adequada ao longo do seu percurso.
- Não deve ter pontos de dissipação brusca de energia. As inclinações devem ser as mais suaves possíveis.
- Os canais não devem ter pontos de estagnação de material (pontos mortos). As tensões durante o fluxo devem ser as mais baixas possíveis e balanceadas.

– A quantidade de linhas de junção do fluxo do material deve ser a menor possível. De forma geral, no entanto, todas elas terão uma equação da forma da equação (VI):

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P}{\mu} \quad (VI)$$

Q = fluxo volumétrico da vazão

K = constante dependendo do perfil interno da matriz

ΔP = diferença da pressão do material entre a entrada e saída da matriz

μ = viscosidade do material na matriz

Alguns valores de K, conforme o perfil de saída da matriz perfil retangular

Como exemplo, a Figura 5.9 mostra uma matriz plana para chapas, bobinas e filmes.

$$K = \frac{bh^3}{12l} \quad \text{perfil retangular}$$

portanto

$$Q = \frac{bh^3}{12l} \cdot \frac{\Delta P}{\mu}$$

h = abertura do lábio

b = largura da matriz

l = comprimento do percurso do material dentro da matriz

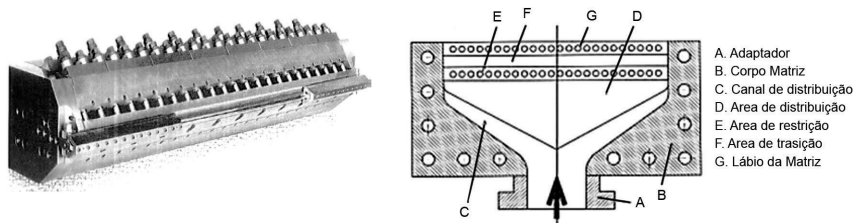


Figura 5.9 – Matriz plana “fechada e aberta” para chapas, bobinas e filmes

Perfil tubular: filmes, tubos, mangueiras, encapamento de fios e cabos, peças sopradas (Figura 5.10).

$$K = \frac{\pi(R-r)^4}{8l} \quad \text{K para perfil tubular}$$

$$Q = \pi \frac{(R-r)^4}{8l} \cdot \frac{\Delta P}{\mu}$$

R = D/2

D = diâmetro interno da matriz (anel)

r = d/2

d = diâmetro do mandril (espiral ou espiga)

l = comprimento do percurso do material dentro da matriz

Algumas recomendações para o filme soprado de PELBD

- Linha de névoa baixa, pois há melhora sensível nas propriedades ópticas e bloqueio.
- Relação de sopro em torno de 2,5:1.
- Abertura da matriz 1,8 a 2,1 mm.
- Combinações de telas de 40 a 120 mesh. A tela mais grossa deve ficar na saída para atuar como suporte da mais fina.

Para o filme plano

- A relação abertura da matriz espessura do filme não deve ser superior a 20:1.
- O cilindro resfriado (*chill roll*) deve ser mantido a 20-30 °C.
- A distância entre os lábios da matriz e a linha de contato do fundido no cilindro deve ser < 25 mm.
- Combinações de telas de 40 a 120 mesh. A tela mais grossa deve ficar na saída para atuar como suporte da mais fina. A Tabela 8.1 traz algumas recomendações para o PELBD.

Tabela 8.1 – Recomendações para o PELBD

Bucha ranhurada – Produtividade (capacidade de transporte na alimentação)	
Tipo de ranhura	Taxa de alimentação específica (kg/h-rpm)
Nenhuma	1,52
Paralela	1,82
Helicoidal horária	1,89

Comparação de produção – Seção de alimentação ranhurada vs. lisa		
	Lisa	Ranhurada
Produção (kg/h)	100	116
Temperatura de trabalho (oC)	218	204
Torque (kW/rpm)	0,24	0,34

8.3 - PEAD - Polietileno de alta densidade

Todos os conceitos anteriormente analisados valem também para o PEAD – polietileno de alta densidade, tendo em vista que a natureza do polímero é a mesma. Algumas diferenças peculiares, entretanto, são evidentes no processamento do polietileno de alta densidade por causa de sua estrutura molecular não ramificada, muito similar à da PELBD.

8.3.1 - Resfriamento

Pode ser verificada, por exemplo, a grande influência do sistema de resfriamento do balão nos dois tipos. O filme de polietileno de alta densidade é normalmente dobrado a quente nos rolos puxadores para evitar o aparecimento de rugas, muito prejudiciais à sua qualidade. Logo, o fechamento do balão deverá começar imediatamente acima da linha de névoa, especialmente em filmes mais finos. Já para os filmes de polietileno de baixa densidade, existe a tendência ao bloqueio quando dobrados a quente.

A altura da torre de resfriamento deverá ser, portanto, bem ajustada para cada caso, permitindo um resfriamento adequado do filme antes que seja dobrado nos rolos puxadores. Esses cuidados no processamento darão ao balão maior estabilidade dimensional, evitando indesejáveis oscilações que afetariam diretamente a espessura final do filme.

Assim como os outros tipos de polietileno, as principais variáveis de processamento que alteram as características físicas do filme são o perfil de temperatura na extrusora, a razão de insuflamento do balão e a altura da linha de névoa.

O adequado processamento é de fundamental importância para a obtenção de filmes com alta resistência mecânica, ou seja, que apresentem um ótimo balanceamento de propriedades na direção de extrusão e na direção transversal (DM/DT).

8.3.2 - Temperatura

É importante que o polímero seja aquecido logo no início da extrusão, atingindo o valor entre 200 a 220 °C na massa polimérica. Caso as temperaturas de processo sejam muito baixas, poderá ocorrer uma má plastificação da massa, com conseqüente prejuízo da aparência superficial do polímero extrudado, na forma de “escamas”, o que compromete sua qualidade.

Altas temperaturas de processamento podem degradar o PEAD, prejudicando as propriedades físicas do filme e tornando-o muito frágil. Muitas vezes, não se observa o devido cuidado operacional desse controle, pois altas temperaturas tornam o material muito fluido, aumentando a produtividade. Entretanto, a fragilidade do filme só será percebida na etapa de formação da sacola plástica, que mostrará pouca resistência ao rasgo.

Um perfil de temperatura crescente é recomendado para o processamento do PEAD na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Perfil de temperatura para o PEAD

Rosca	Cabeçote (tubular)	Matriz (plana)
Zona 1 = 180 °C	Zona = 200 °C	200 °C
Zona 2 = 190 °C		
Zona 3 = 200 °C		

Cuidados no processo na extrusão de filmes de PEAD em relação à temperatura da massa:

- Se a temperatura de processo for alta, o brilho, a transparência e a resistência ao impacto serão melhores.
- Se for muito alta, a massa ficará fluida, com dificuldade de resfriamento uniforme. Poderá haver oxidação da massa (degradação).
- Se for baixa, haverá ruptura do balão e formação de rugas. Se for muito baixa, haverá má homogeneização da massa e espessuras muito variadas. As propriedades ópticas estarão comprometidas.

8.3.3 - Razão de insuflamento

A razão de insuflamento para o polietileno de alta densidade possui uma faixa mais ampla. Ela pode variar de 2,8 a 5,8:1 em razão da necessidade de produzir um filme com maior largura.

Para um PEAD de alto peso molecular, recomenda-se usar uma razão de insuflamento próxima ao limite superior da faixa indicada, para melhor aproveitamento de suas propriedades mecânicas.

As Figuras 8.3 e 8.4 demonstram a resistência à rasgadura Elmendorf e ao impacto de queda de dardo do filme de PEAD.

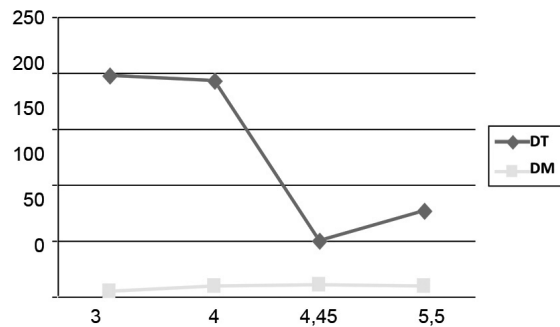


Figura 8.3 – Resistência à rasgadura Elmendorf

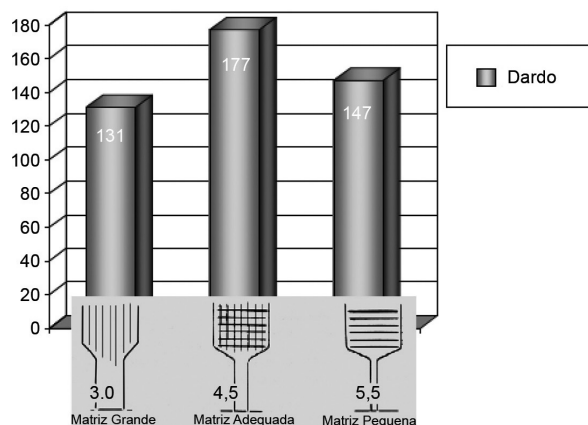


Figura 8.4 – Resistência ao impacto da queda de dardo em razão de sopro PEAD

- O MFR exerce uma grande influência na estirabilidade do filme e, conseqüentemente, na uniformidade de espessura. De fato, MFRs mais reduzidos (menores que 2,5 g/10 min) tendem a proporcionar melhor estirabilidade.
- Resinas de MFRs reduzidos, entretanto, podem apresentar dificuldades de extrusão.

Resinas de MFR superior a 5 g/10 min não podem ser processadas em linhas *stenter* convencionais por deficiência de estirabilidade.

Dessa forma, o MFR em torno de 3 g/min (em resinas convencionais) é considerado apropriado para obter o balanço otimizado entre a extrudabilidade e estirabilidade em linhas de BOPP *stenter*.

A estirabilidade ou facilidade operacional de estiragem de um filme é traduzida pela faixa operacional (*operating window*) no processo de estiramento. Resinas com melhor estirabilidade proporcionam maior uniformidade de espessura.

Outra propriedade importante da resina é o seu teor de atáticos, o que pode ser estimado pelo teor de solúveis em xileno (XS).

Vários estudos indicam que xilenos mais elevados proporcionam melhor estirabilidade. Maior XS significa também que a resina tem temperatura de fusão ligeiramente mais baixa.

Um produtor líder de BOPP tem definido mundialmente a relevância de temperaturas de fusão mais reduzidas na melhoria de desempenho na estirabilidade. A Tabela 12.11 mostra o efeito do XS na estirabilidade do PP. Os dados foram obtidos numa linha *tenter* piloto e a espessura do filme é de 20 micra.

Tabela 12.11 – Efeito do XS na faixa operacional

XS (%)	T inferior (°C)	T superior (°C)	Faixa (°C)
3,2	173	195	22
3,7	169	197	28
4,4	160	197	37

O aumento do XS tem, entretanto, efeito de redução da transparência e da rigidez do filme.

A Tabela 12.12 mostra esses aspectos.

Tabela 12.12 – Efeito do XS na opacidade e módulo de elasticidade do filme

XS (%)	Opacidade (%)	Módulo DM (MPa)	Módulo DT (MPa)
3,2	0,40	2500	4650
3,7	0,52	2440	4780
4,4	0,50	2400	4410

DM = direção da máquina DT = direção transversal

Num nível tecnicamente mais refinado, reconhece-se que as distribuições largas na ponta de pesos moleculares baixos são de grande importância para otimização da estirabilidade. Entre os produtores em geral, tende-se a considerar que DPMs totais largas proporcionam melhor estirabilidade.

Além disso, comenta-se que o motivo para o melhor desempenho seriam as frações de alto peso molecular contidas nesses produtos. Entretanto, há evidências práticas de que somente as frações de alto peso molecular não proporcionam maior estirabilidade.

Há indicações de que a estirabilidade é otimizada com elevadas frações de baixos pesos moleculares. Uma possível explicação é que essas pequenas moléculas teriam de alguma forma uma ação lubrificante, auxiliando o processo de orientação das moléculas maiores.

O pacote de aditivos pode influenciar a estirabilidade. Uma estabilização insuficiente ou degradação excessiva do polímero na extrusão, como pode ocorrer nas grandes linhas de alta vazão, pode levar a uma deficiência na estirabilidade, principalmente no estiramento transversal. Em alguns casos, pacotes de estabilização mais elevados podem ser necessários.

As bordas do filme estirado devem ser aparadas, pois nessas regiões ocorre variação na espessura do filme e sua morfologia é diferente. Na realidade, essas regiões diferenciadas não se limitam às regiões em contato imediato com as garras, mas vão além. Assim, a quantidade de material refilado constitui de 10 a 20% em peso do filme produzido. O material dessas aparas é regranulado e misturado ao material virgem usado na camada central, numa proporção de 10%.

Se o MFR do material regranulado é muito elevado, podem ocorrer problemas de estiramento do filme. Alguns aditivos estabilizantes de processamento mais eficazes podem contribuir para reduzir a ocorrência desse tipo de problema.

12.2.7.3 - Condições especiais de processamento

Alguns transformadores utilizam terpolímeros na camada de recobrimento do filme (*skin layer*). Eles têm temperaturas de selagem mais reduzidas e menores pontos de fusão comparados aos copolímeros randômicos.

Os terpolímeros requerem, portanto, temperaturas de estiramento mais reduzidas, do contrário tendem a grudar nos cilindros de estiramento na direção de máquina (DM) do filme produzido. Nesses casos, a solução comumente adotada é o uso de homopolímeros modificados com etileno (contendo cerca de 1% de etileno) na camada central.

Esses produtos têm uma temperatura de fusão sensivelmente menor que os homopolímeros convencionais, o que permite operar com menores temperaturas de estiramento em DM.

A necessidade de operar com temperaturas reduzidas no estiramento DM faz com que a estirabilidade do homopolímero usado na camada central caia acentuadamente, levando a problemas de furos no filme e/ou não uniformidade de espessura.

12.2.7.4 - Compatibilidade entre camada central e camada de recobrimento

É essencial haver boa compatibilidade entre as camadas central e de recobrimento na produção de BOPP. Mais comumente, os problemas entre as camadas se originam na incompatibilidade reológica dos dois materiais. Isso prejudica as propriedades ópticas do filme, pois cria irregularidades na interface entre as duas camadas constituintes do filme.

É importante que tanto o comportamento viscoso como o comportamento elástico dos dois produtos constituintes do filme sejam semelhantes na região da matriz onde os fluxos se encontram.

Pelas características das grades, os produtos de recobrimento tradicionalmente usados (copolímeros de alto teor de etileno) devem se combinar melhor reologicamente com homopolímeros de distribuição ligeiramente estreita na ponta de altos pesos moleculares (ligeiramente craqueados). Esses polímeros têm um comportamento elástico (medido por inchamento do extrudado – *die swell*) moderado.

Produtos com elevada elasticidade do fundido (elevado *die swell*) não apresentam boa compatibilidade reológica com os produtos de recobrimento citados.

- Homopolímero MFR = 3 g/10 min levemente craqueado (camada central).
- Copolímero randômico com alto teor de etileno com MFR = 7 g/10 min.
- DPM.
- Copolímero randômico de alto teor de etileno acentuadamente craqueado.
- Camada de recobrimento.

Este produto apresenta uma fraca compatibilidade com a camada central.

A viscosidade comparativa dos constituintes do filme pode ser estimada usando-se as curvas de viscosidade, comumente obtidas por reometria capilar.

Note que as viscosidades do homopolímero craqueado e o copolímero tendem a se aproximar em tensões de cisalhamento mais baixos. Já as viscosidades do homopolímero não craqueado e o copolímero tendem a se aproximar em tensões de cisalhamento mais elevadas.

Conhecendo as velocidades de fluxo na matriz da extrusora (que são relacionadas à tensão e taxa de cisalhamento), pode-se estimar em qual região dessas curvas está se operando e as resinas com melhor compatibilidade viscosa e elástica.

12.2.7.5 - Perfil de espessura

Apesar de não existirem estudos sistemáticos na literatura aberta relacionando propriedades da matéria-prima e o perfil de espessura, algumas tendências são conhecidas.

Em sistemas de produção de BOPP *tenter*, MFRs mais reduzidos (< 3 g/10 min) proporcionam melhor perfil de espessura.

Degradação da matéria-prima durante o processamento prejudica o perfil de espessura. Nesse sentido, a utilização excessiva de regranolados provenientes de aparas também contribui para piorar a uniformidade de espessura do filme. Não se sabe ao certo a influência da distribuição de peso molecular da resina (DPM) na regularidade de espessura do filme.

Alguns fabricantes acreditam que altas concentrações de frações de alto peso molecular da resina proporcionam melhor distribuição de espessura. Isso, porém, ainda é controverso e não está comprovado.

Concentrações mais elevadas de atáticos proporcionam melhor perfil de espessura. Isso também foi verificado nos principais produtores mundiais de BOPP. Como a fração atática é de baixo

3,5:1, zona de homogeneização com 3 a 10 passos e L/D mínimo de 24:1. Roscas de dois estágios também produzem bons resultados, desde que tenham uma razão de compressão de 3:1 e a profundidade do segundo estágio seja 1,6 a 1,7 vezes maiores que a do primeiro.

O PPE/PS pode ser extrudado sem ou com telas de até 100 mesh. Entretanto, caso ocorra pulsação, deve-se necessariamente utilizar telas e reduzir a temperatura da massa. Usando-se roscas para PVC, recomenda-se um pacote de telas de 20-40-60 mesh para aumentar a contrapressão e o cisalhamento e reduzir a pulsação.

A Tabela 16.4 relaciona algumas recomendações das dimensões de roscas para PPE/PS.

Tabela 16.4 – Dimensões de roscas recomendadas para PPE/PS

Diâmetro da rosca (mm)	Profundidade da zona de mistura (mm)	Número de passos da zona de mistura	L/D	Razão de compressão
60	4,0 – 5,0	4 – 7	24	2,5 – 2,8
90	6,0 – 7,0	4 – 7	24	2,5 – 2,8
120	6,5 – 7,5	4 – 7	24	2,5 – 2,8

16.3.2 - Matriz

O PPE/PS pode ser extrudado em produtos de parede uniforme ou não. Entretanto, neste último caso, recomenda-se que a espessura maior seja no máximo 1,5 vezes a menor, conforme ilustração da Figura 16.14. Todos os cantos vivos devem ser arredondados, conforme mostrado na Figura 16.15. O comprimento da matriz deve ser 10 vezes a altura do canal e, para alcançar a espessura final da parede do produto, o estiramento não deve ultrapassar 30%.

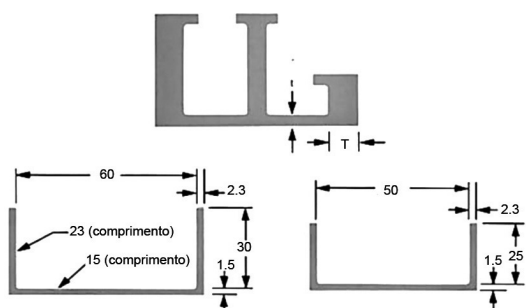


Figura 16.14 – Dimensões (mm) recomendadas para perfis de parede não uniformes em PPE/PS

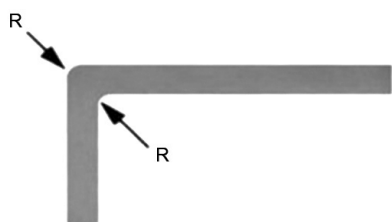


Figura 16.15 – Recomendação de raios para cantos de perfis extrudados em PPE/PS

Raios de 0,4 a 1,6 mm para espessuras de parede de 0,7 a 3,0mm

16.3.3 - Resfriamento e calibração

Ar ou água podem ser utilizados como meio refrigerante para PPE/PS, embora esta última seja limitada a perfis com espessura constante, pois pode causar empenamento em seções não uniformes. Sua temperatura não deve ser inferior a 40 °C para minimizar as tensões residuais. A refrigeração a ar, por ser mais lenta, permite maior tempo para a conformação do produto, reduzindo as tensões internas e propiciando peças livres de empenamento.

16.3.4 - Processamento

Para a blenda PPE/PS, a pré-secagem somente é necessária para a fabricação de peças com excelente acabamento superficial, pois o material possui boa resistência à hidrólise, mesmo a temperaturas elevadas. No caso de aparecimento de bolhas, deve-se secar o material por 2 a 4 h, de 95 a 105 °C.

Purga e limpeza: PS, PEAD ou PMMA são bons materiais de purga para o PPE/PS em curtas paradas de máquina. Entretanto, a extrusora **não deve ficar parada com o PPE/PS no canhão por mais de 10 minutos, para não carbonizar e gerar pintas pretas e perda de propriedades.**

Início do processo: Para iniciar a extrusão deve-se configurar a temperatura da primeira zona para aproximadamente 150 °C e da última zona para 200 °C, colocando nas demais um perfil linear crescente. Após a estabilização da temperatura, deve-se passar o PEAD a uma velocidade de rosca de aproximadamente 5 rpm, colocar o cabeçote e aumentar as temperaturas de todas as zonas para 260 °C. Após esse ajuste, deve-se extrudar uma quantidade de PPE/PS a fim de forçar o PEAD residual para fora e prosseguir com a extrusão normal. As temperaturas de processo recomendadas para o PPE/PS são apresentadas na Tabela 16.5.

Tabela 16.5 – Perfil de temperatura para extrusão de PPE/PS

Zonas de aquecimento	Temperaturas (°C)
Zona 1 (alimentação)	175
Zona 2	185
Zona 3	195
Zona 4	205
Adaptador	215
Matriz	215
Massa	200 – 225

Interrupção do processo: No encerramento do processo, quando o funil de alimentação estiver quase vazio, deve-se adicionar uma quantidade de PS, reduzindo a velocidade da rosca para 5 rpm e a temperatura da zona de alimentação para aproximadamente 200 °C. Assim que a extrusora esfriar e o funil esvaziar, deve-se adicionar PEAD de baixa fluidez. Quando o funil estiver vazio novamente, a extrusora deve ser desligada e o PEAD deixado na máquina. Em seguida, deve-se

Problemas em Tubos e Mangueiras, suas Possíveis Causas e Soluções

Problemas	Causas	Possíveis soluções
Irregularidades das paredes	Matriz descentralizada em relação ao macho.	Centralizar a matriz através dos parafusos de regulagem.
	Banheira de calibragem fora do alinhamento da extrusora.	Alinhar a banheira de calibragem.
	Macho empenado e fora de centro em relação à matriz.	Substituir o macho.
Riscos longitudinais	Saliências na matriz ou macho, causadas por batidas casuais, que possibilitam a formação de rebarbas.	Desmontar o cabeçote e sanar os defeitos da superfície da matriz ou macho.
	Impurezas retidas na bucha de calibração.	Efetuar a limpeza geral no cabeçote.
Partículas sólidas de material não plastificado na superfície	Mistura de compostos com características de fluidez diferentes.	Utilizar material adequado.
	Baixa temperatura de processamento.	Regular adequadamente a temperatura de processo. Aumentar a compressão na zona do cilindro próxima ao cabeçote, (plastificação) abaixando a temperatura ou mudando o jogo de telas.
Peso além das especificações	Baixa rotação do puxador.	Aumentar a rotação do puxador.
Bolhas	Umidade muito elevada no material.	Secar o material em estufas ou em equipamento adequado.
	Excesso de lubrificante no material.	Reduzir a quantidade de lubrificante na preparação do material.
	Desprendimento de gases do material em processo.	Fazer a regulagem adequada do tipo de material em processo.

20.7 - Extrusão

A extrusão de polipropileno em pó ou grânulos não apresenta grandes dificuldades, porém alta produtividade associada à qualidade e homogeneização do filme. Pode ser obtida se o equipamento de extrusão tiver os componentes como rosca, canhão, matriz e controles de temperaturas, além de velocidades bem reguladas e em conformidade com as necessidades reológicas demandadas pela resina. A rosca de extrusão recomendada para o uso em polipropileno deve ter a relação comprimento/diâmetro de pelo menos 24:1.

Comprimentos maiores, de até 30:1, estão disponíveis. Porém, o comprimento extra é apenas vantajoso para permitir maior produtividade. Pela mesma razão, o desenho do parafuso é também importante, em particular a disposição de um comprimento adequado da profundidade correta na seção de dosagem. Se a seção é muito rasa ou longa, o trabalho excessivo no material irá, em conjunto com uma elevada contrapressão, conduzir a baixa produtividade. Para uma rosca boa para a produção de filmes de PP é desejável ter uma razão de compressão entre 4:1 e 5:1 durante uma única volta da rosca. As dimensões das roscas estão listadas na Tabela 20.4, sendo adequadas para a produção de polipropileno.

Tabela 20.4 – Dimensão de roscas para polipropileno e vazões esperadas

Diâmetro do barril	D	45 mm	60 mm	90 mm	120 mm
Comprimento/diâmetro	L/D	24:1	24:1	24:1	24:1
Passo (mm)		45	60	90	120
Zona de alimentação					
Comprimento		3D	3D	3D	3D
Profundidade do canal (mm)		8,4	10	12,7	14
1ª Zona de compressão (baixa)					
Comprimento		8D	8D	8D	8D
Profundidade do canal (mm)		8,4 → 6,3	10 → 7,6	12,7 → 7,6	14 → 10
2ª Zona de compressão (alta)					
Comprimento		1D	1D	1D	1D
Profundidade do canal (mm)		6,3 → 2,2	7,6 → 2,3	7,6 → 3	10 → 3,3
Zona de dosagem					
Comprimento		12D	12D	12D	12D
Profundidade do canal		2,2	2,3	3	3,3
Folga barril rosca		0,05	0,06	0,09	0,12
Produção esperada (kg/h)		27	54	130	280
Rotação rosca (rpm)		120	120	100	100

A Figura 20.7 apresenta o desenho de uma rosca para polipropileno conforme recomendações dos fabricantes de roscas para extrusão