

**LEONORA MARIA NOVAES**

*Leonora  
8/11/12/02  
10,0 (dez)*

## **Otimização do processo de extrusão de uma máquina sopradora.**

**Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título de  
Graduação em Engenharia**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica**

**Orientador:  
Prof. Livre Docente  
Marco Stipkovic Filho**

**São Paulo  
2002**



Ao meu pai Francisco, a minha mãe Dirce, aos meus irmãos Thiago e Emanuela e à minha família, porque vocês são a razão da minha vida. Que Deus nos ilumine hoje e sempre.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Livre Doscente Marco Stipkovic Filho e a todo os professores e funcionários da Universidade de São Paulo, minha sincera gratidão.

Ao meu querido Thiago, meu carinho eterno e minha admiração.

A todos os meus amigos politécnicos, que jamais me deixaram duvidar que estava no caminho certo.

---

"Os teimosos são os sublimes. Quem é apenas bravo tem só um assomo, quem é apenas valente tem só um temperamento, quem é apenas corajoso tem só uma virtude; o obstinado na verdade tem uma grandeza. Quase todo o segredo dos grandes corações está nesta palavra: perseverando. A perseverança está para a coragem como a roda para a alavanca; é a renovação perpétua do ponto de apoio."

Victor Hugo em "Os trabalhadores do Mar"

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
3.1. Moldagem por Sopro .....	5
3.2. Projeto de Rosca Extrusora .....	7
3.3. Manual de Moldagem por Sopro da Bekum .....	8
3.4. Desempenho Dinâmico de uma Rosca Simples de Diferentes Configurações.....	9
3.5. O Projeto de Roscas de Extrusão: uma Aproximação para Otimizar.....	11
<b>PARTE I: DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR SOPRO.....</b>	<b>12</b>
<b>4. PROCESSO HISTÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>5. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO .....</b>	<b>14</b>
<b>6. TIPOS DE PROCESSO DE MOLDAGEM POR SOPRO .....</b>	<b>16</b>
6.1. Moldagem por Extrusão e Sopro .....	16
6.2. Moldagem por Extrusão e Sopro com Acumulação.....	17
6.3. Moldagem por Injeção e Sopro.....	17
6.4. Moldagem por Sopro e Estiramento.....	17
6.5. Moldagem por Coextrusão e Sopro .....	18
<b>7. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....</b>	<b>20</b>
7.1. Sistema de acionamento .....	20
7.2. Canhão .....	21
7.3. Rosca.....	21
<b>8. UNIDADE DE SOPRO .....</b>	<b>24</b>
<b>9. OPERAÇÕES AUXILIARES .....</b>	<b>26</b>
9.1. Aquecimento da massa .....	26
9.2. Refrigeração .....	26
9.3. Acabamento e decoração de artigos .....	27
<b>PARTE II: ANÁLISE DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA</b>	<b>28</b>
<b>10. PROPRIEDADES IMPORTANTES DOS POLÍMEROSEN.....</b>	<b>29</b>
10.1. Propriedades Reológicas .....	29
10.1.1. Material a granel .....	29

10.1.2. Material Pastoso .....	30
10.2. Propriedades Térmicas .....	32
11. ZONA DE ALIMENTAÇÃO .....	34
11.1. Modelo Físico e Matemático.....	35
11.2. Algumas considerações sobre o perfil de pressão em função de z.....	38
11.3. Algumas considerações sobre as forças de atrito no solid bed .....	39
11.4. Algumas considerações sobre Geração de Calor por atrito.....	39
12. ZONA DE PLASTIFICAÇÃO .....	41
12.1. Modelo Tadmor de Plastificação .....	41
12.2. Fontes de Energia para plastificação .....	42
12.3. Determinação da Taxa de Plastificação.....	43
12.4. Consumo de Potência .....	46
13. ZONA DE TRANSPORTE.....	49
14. PROJETO DA ROSCA DA EXTRUSORA.....	54
14.1. Considerações Mecânicas.....	54
14.1.1. Resistência à Torção da Raiz da Rosca.....	54
14.1.2. Resistência do Filete da Rosca .....	56
14.2. Otimização quanto ao consumo de potência.....	57

<b>PARTE III: IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS FUNÇÕES DE OTIMIZAÇÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>15. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO .....</b>	<b>61</b>
15.1. Método de Newton-Raphson.....	61
15.2. Apresentação dos modelos para otimização.....	62
15.2.1. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da profundidade do canal na Zona de Transporte .....	62
15.2.2. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da folga radial do filete na Zona de Transporte .....	65
15.2.3. Determinação da proporção da potência total gasta na folga radial do filete em função da largura do filete na Zona de Transporte.....	67
15.2.4. Determinação da proporção da potência total gasta na folga radial do filete em função do power law index na Zona de Transporte .....	68
15.2.5. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da profundidade do canal na Zona de Plastificação .....	69
15.2.6. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da folga radial do filete na Zona de Plastificação .....	70
15.2.7. Determinação da taxa de plastificação em função da folga radial do filete na Zona de Plastificação .....	71
15.2.8. Determinação da proporção da potência total gasta na folga radial do filete em função da largura do filete na Zona de Plastificação .....	72
15.3. Resultado e Análise da Implementação.....	73
<b>PARTE IV: VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA EXTRUSORA COMERCIAL</b>	<b>78</b>
<b>16. ANÁLISE CRÍTICA DE UMA EXTRUSORA COMERCIAL .....</b>	<b>79</b>
<b>17. CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO – Códigos de Programação.....</b>	<b>86</b>
I - Função Newton Rapson .....	87
II - Função de Cálculo Ângulo $\varphi$ ótimo na zona de transporte .....	88
III - Função de Gráfico do Ângulo $\varphi$ ótimo x H na zona de transporte .....	90

IV - Função de Gráfico do Ângulo $\phi$ ótimo x $\delta$ na zona de transporte.....	92
V - Função de Cálculo da Potência gasta na Folga na zona de transporte .....	94
VI - Função de Proporção entre a Potência gasta na Folga e largura do filete na zona de transporte.....	95
VII - Função gráfico da Potência consumida na Folga x Power Law Index na zona de transporte.....	96
VIII - Função de Cálculo Ângulo $\phi$ ótimo na zona de plastificação.....	97
IX - Função de Gráfico do Ângulo $\phi$ ótimo x H na zona de plastificação .....	100
X - Função de Gráfico do Ângulo $\phi$ ótimo x $\square$ na zona de plastificação .....	102
XI - Função de Cálculo da taxa de plastificação .....	104
XII - Função Gráfico da Taxa de Plastificação x Folga.....	105
XIII - Função de Cálculo da Potência gasta na Folga na zona de Plastificação.....	106
XIV - Função de Proporção entre a Potência gasta na Folga e largura do filete na zona de plastificação .....	108
18. BIBLIOGRAFIA .....	110

## **1. INTRODUÇÃO**

A moldagem por sopro é o processo pelo qual se produzem artigos ocos fechados. O conceito desse processo é baseado na indústria de vidro e suas técnicas. Não se sabe ao certo quando as primeiras descobertas sobre o uso do ar como inflador foram realizadas, mas atribui-se isso às primeiras civilizações do mundo, os Sumérios e Egípcios.

A moldagem por sopro representa hoje, segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), 18% do mercado de transformação de resinas no Brasil. E, dentro desse processo, a moldagem por extrusão e sopro responde por 90% da indústria. Assim sendo, o objeto de estudo deste projeto é uma máquina de moldagem por sopro e extrusão de rosca única, uma vez que essa é a extrusora mais popular.

A primeira fase do projeto fornece a base teórica para o restante do processo de otimização. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica e, a partir dela, traçou-se a cronologia histórica do desenvolvimento da moldagem por sopro e também uma descrição de todo o funcionamento desse processo de conformação plástica.

A segunda parte é a responsável pela análise do processo de preparação da matéria-prima, ou seja, da extrusão do material. Primeiramente, fez-se uma revisão das propriedades dos polímeros importantes para o processo e, em seguida, uma modelagem física e matemática das zonas funcionais da extrusora (alimentação, plastificação e de transporte).

A fase 3 é a responsável por implementar computacionalmente e validar o procedimento de otimização da geometria da rosca em relação ao consumo de potência. Em um primeiro passo, implementou-se o Método de Newton Rapson para resolução dos sistemas de equação. Em seguida, utilizando os exemplos fornecidos pela bibliografia [1], definiu-se os procedimentos para determinação do ângulo de rosca, da profundidade do canal, da folga e largura do filete ótimos para as duas últimas zonas da rosca. E, para validar os códigos desenvolvidos, esses procedimentos foram simulados e os resultados comparados aos resultados dos exemplos da bibliografia [1].

Para finalizar o projeto, utilizou-se todo o procedimento de otimização desenvolvido nas fases anteriores para analisar uma extrusora de uso comercial.

## **2. OBJETIVO**

Melhorar o processo de sopro de uma máquina sopradora de rosca única, tendo como parâmetro principal a potência de acionamento da extrusora. Para isso, encontrar uma relação ótima entre as configurações da rosca e do canhão que forneça, no mínimo, a mesma capacidade de plastificação apresentada hoje e exija uma menor potência de acionamento.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### ***3.1. Moldagem por Sopro (Blow Molding)***

Tendo como objetivos principais permitir que se decida conscientemente por utilizar ou não o processo de moldagem por sopro e ser referência para engenheiros, projetistas e compradores, são fornecidas as bases históricas e teóricas sobre esse processo.

A primeira parte introduz o tema e faz um breve histórico do desenvolvimento do processo de moldagem por sopro. Em seguida, apresenta os vários tipos de máquinas sopradoras. A partir de então, inicia-se a apresentação dos pontos importantes a serem considerados no projeto da matriz, do cabeçote, dos moldes e do produto. Além disso, relata as operações secundárias que o produto pós-moldagem exige. As principais são de acabamento (remoção de rebarbas, alargamento da abertura do gargalo, usinagem da face do selo) e decoração (estampagem e impressão). Outra operação secundária descrita é o processo de reutilização dos refugos.

Na parte seguinte, os materiais termoplásticos são apresentados. As poliamidas, os poliacetatos, os policarbonatos, os polietilenos e os polipropilenos são descritos com maiores detalhes, tendo suas propriedades físicas, resistência química e permeabilidade apresentadas. Posteriormente, o processamento dos materiais detalhados anteriormente é apresentado. As suas características gerais são fornecidas, ora enfatizando os procedimentos de secagem, ora o controle da pressão.

Em seguida, procedimentos de testes e controle de qualidade pelos quais os produtos finais devem passar são mostrados. Além disso, especificam-se também os testes que as embalagens para comida devem enfrentar, tais como, de toxicidade e permeabilidade.

E por último, é feita uma breve descrição do mercado dos produtos de moldagem por sopro, das suas aplicações, das patentes e das tecnologias especiais desenvolvidas.

### ***3.2. Projeto de Rosca Extrusora (Extruder Screw Design)***

Objetiva apresentar métodos eficientes para se prever o escoamento da massa fundida no equipamento de extrusão polimérica, a fim de solucionar problemas práticos de operação e projeto encontrados na indústria.

Inicialmente, as propriedades relevantes dos polímeros para o processo de extrusão são apresentadas, além dos métodos existentes para medi-las. Em seguida, modelos matemáticos são desenvolvidos para se prever o escoamento do fluido ao longo dos canais do parafuso. Todo o desenvolvimento é baseado nas equações fundamentais da mecânica do contínuo. Posteriormente, as soluções para as equações anteriormente encontradas são analisadas. Inicialmente é feita uma revisão das soluções publicadas. Em seguida, são apresentadas e comparadas as soluções uni- e bidimensionais.

A partir de então, diversos fatores importantes no processo de moldagem são apresentados e analisados. Primeiramente é a potência consumida durante o processo de extrusão. Esse consumo é considerado tanto no caso de escoamento unidimensional quanto bidimensional. Em seguida, a capacidade de mistura da extrusora é estudada. Novamente, essa análise é feita uni- e bidimensionalmente. Além disso, maneiras de se melhorar a mistura são apresentadas. A seguir, é examinada a transferência de calor em um sistema típico de refrigeração de um parafuso, com o objetivo de permitir o cálculo do gradiente de temperatura em qualquer ponto ao longo do parafuso.

Finalizando, descreve como os resultados apresentados anteriormente podem ser utilizados para se prever o comportamento global de uma extrusora. Apresenta, também, experimentos que possibilitam a obtenção de alguns resultados práticos para serem comparados com alguns resultados teóricos até então desenvolvidos.

### ***3.3. Manual de Moldagem por Sopro da Bekum***

Inicia-se com uma breve introdução a moldagem por sopro. Apresenta as principais etapas do processo e as suas variações mais comuns, os materiais mais utilizados e as características do produto final. Em seguida, explica sucintamente as combinações principais da moldagem por sopro: moldagem por extrusão e sopro, moldagem por extrusão e sopro com acumulação, moldagem por injeção e sopro, moldagem por sopro e estiramento, moldagem por coextrusão e sopro.

Posteriormente, apresenta as principais propriedades e características dos materiais plásticos. São apresentados também alguns cuidados que se deve ter durante o manuseio da matéria prima, e, além disso, alguns processos secundários ao processo de moldagem são descritos, tais como: secagem, coloração e reprocessamento.

O sistema de moldagem por sopro também é descrito, identificando as suas partes fundamentais e alguns dados técnicos característicos dessas partes. A seguir, caracteriza-se a operação de moldagem por extrusão e sopro (combinação que mais processa matéria prima), abordando desde o processo de aquecimento e introdução de calor, passando pela limpeza da extrusora, até o acabamento e decoração de artigos.

Em seguida, os materiais específicos para a moldagem por sopro são apresentados. Para cada um deles, são fornecidos o termo químico, os nomes comerciais e seus produtores, algumas características da sua fabricação, a sua facilidade de fluxo, resistência, coloração, e certas exigências no manuseio desse material. Além disso, apresenta as configurações básicas da rosca e canhão, do cabeçote, e algumas considerações sobre a operação de moldagem utilizando esse material.

Para finalizar, tabelas e fórmulas úteis, exemplo de ficha de processo e glossário de termos são apresentados.

### ***3.4. Desempenho Dinâmico de uma Rosca Simples de Diferentes Configurações*** ***(Dynamic Performance of Single-Screws of Different Configurations)***

Utilizando-se uma extrusora especialmente fabricada e adaptada à pesquisa, investigou-se o desempenho dinâmico de uma rosca simples sob diversas configurações.

Foi empregada uma extrusora para polietileno de baixa densidade, baseando-se no fato de esse polímero ser o mais processado na região da Ásia do pacífico. A rosca da extrusora é de 45 mm de diâmetro, o cilindro possui oito aberturas, quatro em cada lado, oportunamente localizadas. Cada abertura é coberta por uma placa de vidro curva, cujo raio interno é o mesmo do cilindro.

A principal variável de processo é a rotação da rosca, que foi de 10, 25, 50 e  $80\text{ min}^{-1}$ . As temperaturas das quatro regiões de aquecimento foram de 170, 210, 220 e 220°C. As configurações da rosca utilizadas foram: rosca de barreira, pinos misturadores, maddock, rosca com misturador tipo abacaxi e uma rosca padrão.

Para as medidas de pressão, foram instalados três transdutores de pressão ao longo do cilindro. Para a investigação do caminho e velocidade de escoamento do material, tempo de permanência e sua distribuição, foi introduzido um riscador colorido de ponto de fusão superior ao LDPE. Para a investigação da dispersão e homogeneização, introduziu-se masterbatch colorido de ponto de fusão similar ao do LDPE. E para a investigação da qualidade da mistura, introduziu-se uma pequena porcentagem de carbono preto.

Os resultados obtidos foram:

- A taxa de saída aumenta de maneira diretamente proporcional ao aumento do perfil de pressão ao longo da rosca, até um limite superior de pressão que inverte essa relação. A configuração do tipo Maddock foi a que forneceu maior taxa;

- O resultado anterior pode ser também explicado pela maior taxa de transporte apresentada pela configuração Maddock, tanto na fase de alimentação como na seção de compressão;
- O tempo de permanência (RT) é inversamente proporcional à taxa de extrusão (ET), ou seja, quanto menor RT, maior ET;
- A mistura e a homogeneização são melhores quando algum tipo de misturador é inserido na rosca;

### **3.5. *O Projeto de Roscas de Extrusão: uma Aproximação para Otimizar***

**(The Design of Extrusion Screws: An Optimization Approach)**

Este trabalho discute uma metodologia de projeto de rosca baseado em uma aproximação para otimizar. De acordo com essa metodologia, as equações disponíveis para solucionar o problema direto são usadas iterativamente a fim de otimizar uma função de objetivos, que avalia o desempenho de uma rosca em relação a um certo número de critérios de projeto e a importância relativa de cada um deles. É apresentado também um esquema de otimização alternativo, envolvendo o uso das fronteiras de Pareto ótimas ou não-dominantes, que correlacionam o conjunto das melhores soluções individuais (aqueles que consideram um único critério). Algoritmos genéticos foram adotados pela suas capacidades de lidar com problemas de caráter combinatório e porque eles não requerem conhecimentos adicionais sobre o processo.

**PARTE I: DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR  
SOPRO**

#### **4. PROCESSO HISTÓRICO**

O conceito da moldagem por sopro comercial é baseado na indústria de vidro e suas técnicas. Não se sabe ao certo quando as primeiras descobertas sobre o uso do ar como inflador foi realizada, mas atribui-se isso aos Sumérios e Egípcios.

No final do século XIX surgiram as primeiras patentes sobre o uso de tubos formados para a moldagem por sopro (em 1851 nos Estados Unidos da América e em 1881 na Alemanha).

A partir de 1930, o desenvolvimento do Polietileno permitiu um aumento na produção de máquinas e, conseqüentemente, de produtos, por apresentar uma grande facilidade de processamento e propriedades físicas ideais para a moldagem. Até então, as matérias-primas utilizadas (Acetato de Celulose e Poliestireno) requeriam enormes cuidados e supervisão constante durante o processo, representando, assim, grandes problemas para as máquinas disponíveis. Durante as décadas de 30 a 50, dezenas de patentes sobre máquinas e matérias-primas foram registradas nos EUA, demonstrando a fase de intenso desenvolvimento do processo de moldagem por sopro. E, a partir dos anos 50, ocorreu a internacionalização desse processo de conformação de plástico.

Durante as três décadas seguintes, o desenvolvimento de máquinas, de processos de fabricação e de matérias-primas foi grande, impulsionado pelo aumento do mercado de produtos moldados por sopro. E, a década de 90, caracterizou-se pela automação total do processo.

## **5. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO**

Moldagem por sopro é o processo que produz artigos ocos fechados, desde recipientes para produtos de limpeza e alimentos, passando por brinquedos e até acessórios automotivos. Limita-se a utilização de materiais termoplásticos.



a) recipiente para refrigerante



b) recipiente para sabonete líquido

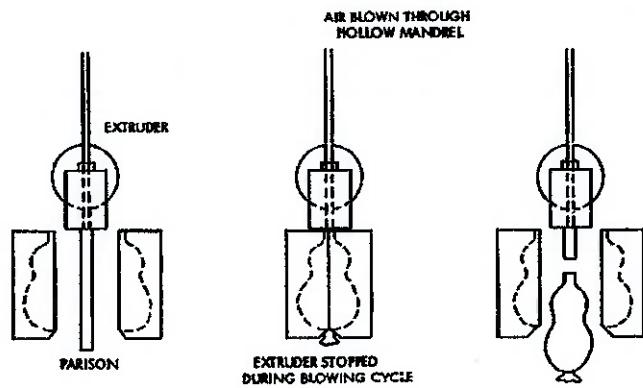
**Figura 1 Exemplos de recipientes produzidos por moldagem por sopro**

Basicamente, uma unidade de produção desse processo é composta pelos seguintes componentes:

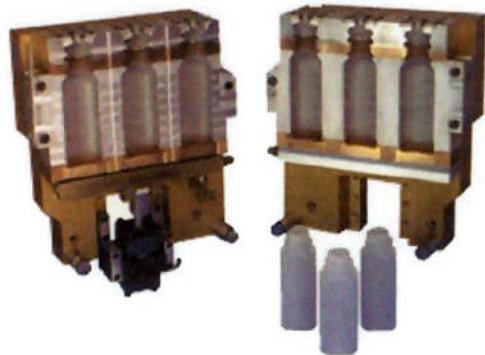
- 1) Máquina de preparação da matéria prima;
- 2) Sistema de formação da pré-forma;
- 3) Estação de moldagem;

A primeira etapa do processo é a preparação do plástico, que deve ser fundido, misturado e homogeneizado. Para isso, utiliza-se uma injetora ou uma extrusora, que também são responsáveis pela produção do parison (pré-forma).

Na terceira etapa, o parison é deslocado para dentro do molde de sopro, que se fecha para permitir que a pré-forma seja inflada contra as suas paredes. Em seguida, ocorre a refrigeração do produto e a sua expulsão da unidade de produção. Em muitos casos, é necessária uma operação posterior de acabamento, tais como, rebarbagem, impressão, etiquetagem.



**Figura 2 Exemplo de uma moldagem por sopro (molde fixo e extrusão descontinua)**



**Figura 3 Exemplo de um molde triplo para fabricação de garrafa de suco  
(M.C. Molds, Inc.)**

## 6. TIPOS DE PROCESSO DE MOLDAGEM POR SOPRO

### 6.1. *Moldagem por Extrusão e Sopro*

Esse é o processo mais utilizado na produção de artigos por moldagem por sopro. É caracterizado pela utilização de uma extrusora para a preparação da matéria-prima e formação do parison. Normalmente, utiliza-se uma extrusora de rosca única, que é a mais popular por ser relativamente simples, barata e apresentar uma produção contínua com facilidade.

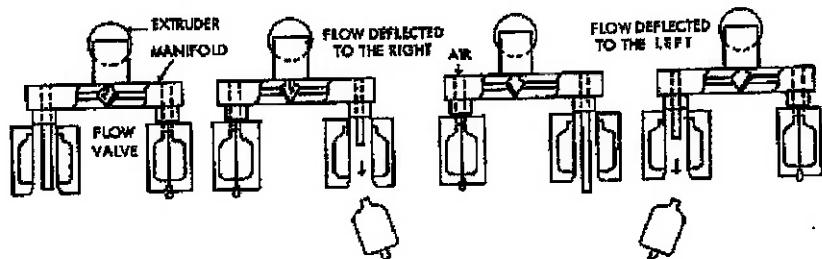


Figura 4 Máquina de extrusão e sopro com estação de escoamento alternada

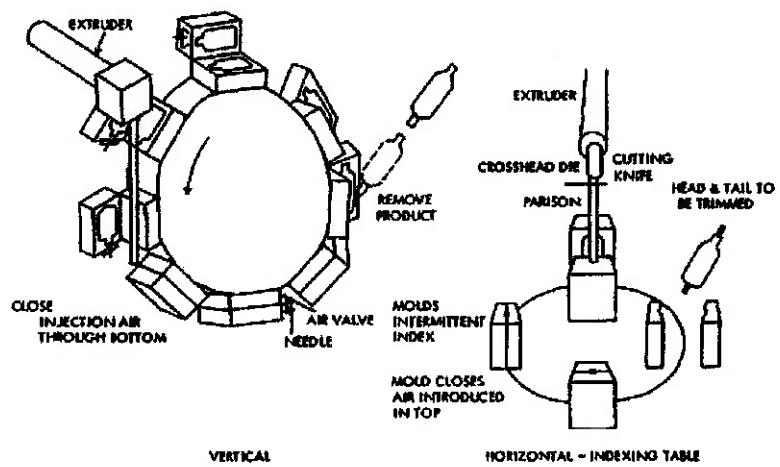


Figura 5 Máquina de extrusão e sopro com multi-estação rotativa

## ***6.2. Moldagem por Extrusão e Sopro com Acumulação***

É utilizado quando os artigos a serem produzidos são de grande porte e exigem uma distribuição de espessura de parede apropriada.

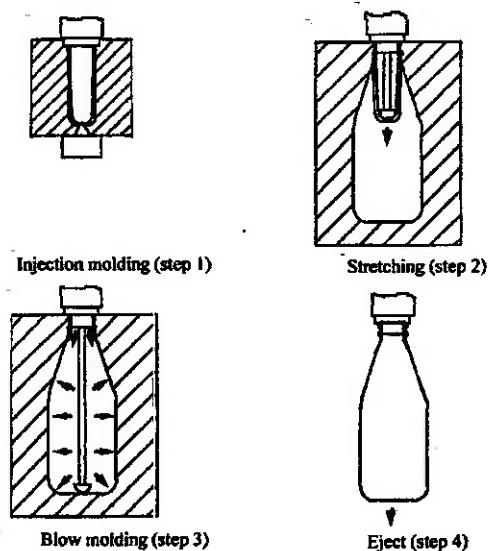
Para esse tipo de artigo, é necessária a produção de um grande parison. Porém, após o término da extrusão, a pré-forma sofre um alongamento devido ao seu tamanho e peso, que diminui a espessura na parte superior. Como solução, um acumulador é colocado no final do canhão da extrusora para receber a quantidade de matéria-prima necessária para uma rápida produção do parison. E, com esse processo, é possível um controle axial e/ou radial da espessura da parede.

## ***6.3. Moldagem por Injeção e Sopro***

Neste processo, a pré-forma é produzida por injeção, sendo fechada em uma das extremidades. É utilizado para garantir uma boa repetibilidade e também uma alta precisão no dimensionamento de uma certa área do produto, principalmente o gargalo. Fornece também um produto sem emendas, marcas de esmagamento e rebarbas.

## ***6.4. Moldagem por Sopro e Estiramento***

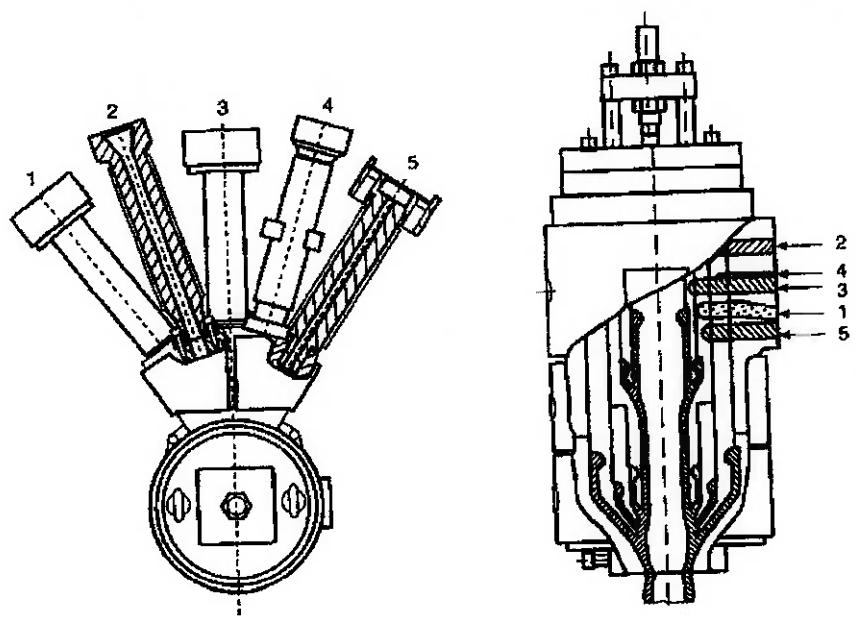
Esse processo adiciona à moldagem por injeção e sopro uma fase de estiramento da pré-forma. Esse estiramento permite que o produto final tenha as suas moléculas orientadas biaxialmente, e, portanto, alta resistência a impacto nessas duas direções. A primeira orientação é dada pelo processo de estiramento, e a segunda, pelo estágio do sopro.



**Figura 6 Processo de Moldagem por sopro e estiramento**

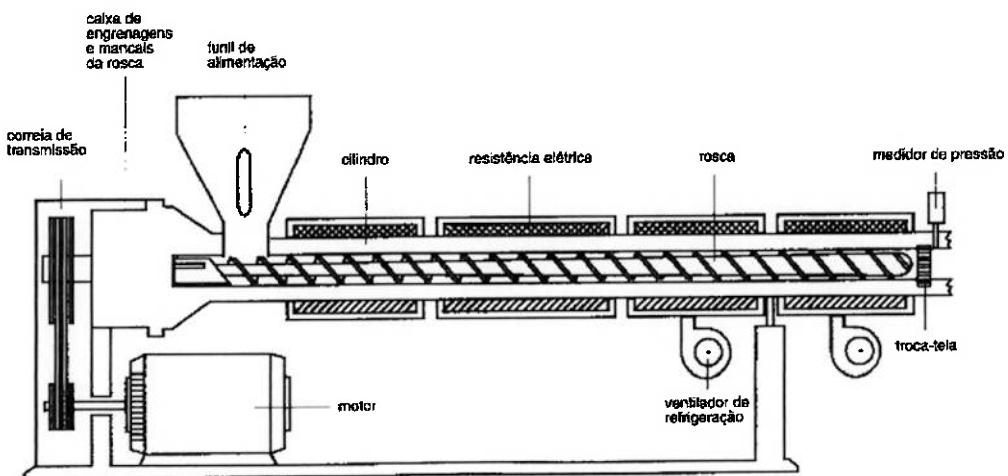
### **6.5. *Moldagem por Coextrusão e Sopro***

Nesse processo de moldagem, a pré-forma é composta por várias camadas de plásticos. Para isso, o sistema de formação da pré-forma é composto por múltiplas extrusoras, que produzem os múltiplos parisons de maneira sobreposta. O grande objetivo desse processo é diminuir a permeabilidade do produto tanto ao oxigênio, ao dióxido de carbono como ao vapor de água. Outro objetivo é a economia de material plástico e também de materiais para pigmentação, que são utilizados somente na camada externa do produto. No caso de se utilizar material reciclado na fabricação do recipiente, adiciona-se externamente uma camada de um material de melhor aparência.



**Figura 7 Diagramas dos cabeçotes de coextrusão**

## 7. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA



**Figura 8 Corte Transversal de uma extrusora de rosca simples<sup>3</sup>**

### 7.1. Sistema de açãoamento

O sistema de açãoamento de uma extrusora é composto de motor, elementos de interligação e o mancal de pressão da rosca. Este sistema é dimensionado para suportar a rosca dentro do canhão e para transmitir a ela rotação, que deve ser mantida constante, mesmo sob variação de carga ou de temperatura no sistema de açãoamento.

Os motores são, na sua maioria, de corrente contínua. O redutor utilizado pode ser de engrenagens ou de correia. Os mancais de apoio da rosca devem suportá-la no sentido horizontal, além de transmitir-lhe torque. Essa transmissão é possível pela existência de uma luva de açãoamento dentro da carcaça do mancal.

## **7.2. *Canhão***

É o cilindro que envolve a rosca. Esses dois componentes são responsáveis pelo transporte e plastificação do material, além da produção da pressão necessária para saída do material pelo bocal.

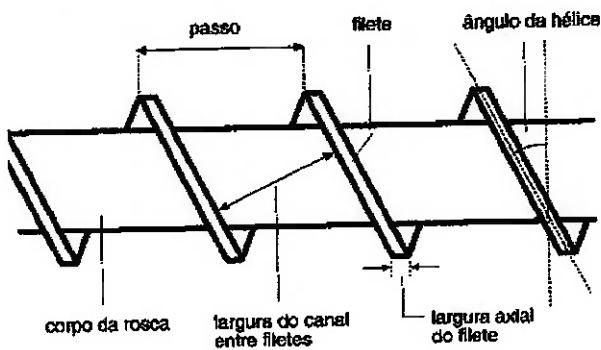
O canhão é dividido em zonas que possuem seu próprio sistema de aquecimento/refrigeração. São controladas por sensores de temperatura e por algum equipamento associado, por exemplo, um regulador de temperatura do tipo PID.

De acordo com o material extrudado, o canhão pode exigir algumas modificações, tais como:

- Abertura para ventilação: permite escape de gases que causariam bolhas no produto;
- Presença de ranhuras longitudinais na sua primeira zona: aumenta a capacidade de mistura e homogeneização;

## **7.3. *Rosca***

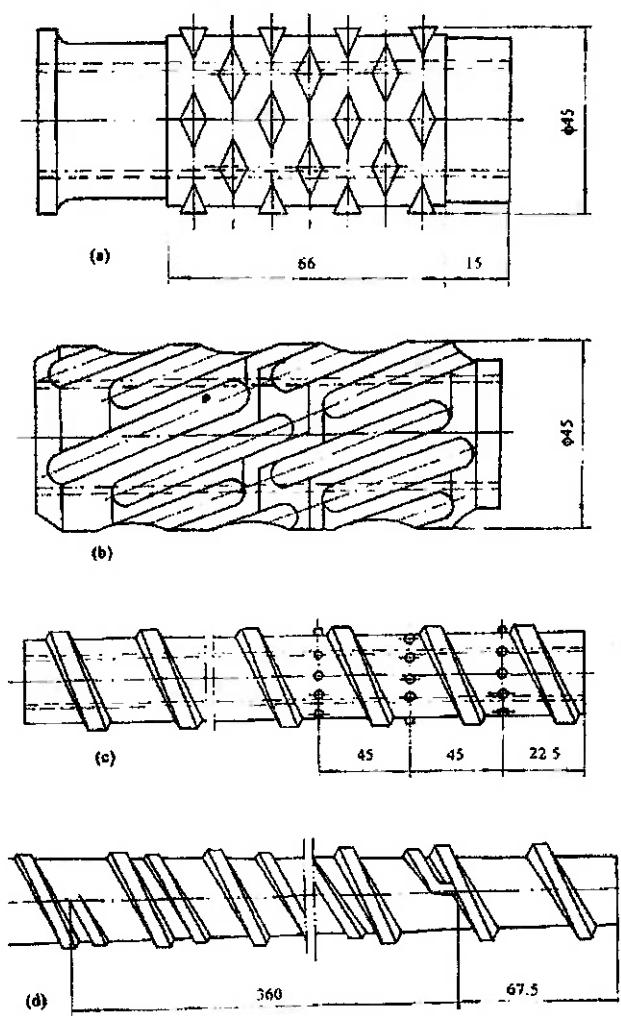
Uma rosca típica possui profundidade variável ao longo do seu comprimento. Essa variação compensa a redução de volume do plástico, resultante da fundição do granulado.



**Figura 9 Parâmetros básicos de uma rosca**

De acordo com as taxas de compressão da rosca, que estão intimamente relacionadas à profundidade do canal, essa é dividida em zonas, que variam em número de 3 a 12. Em uma rosca típica, a zona que começa na parte traseira do funil de alimentação é conhecida como *zona de alimentação*. Essa parte possui profundidade constante e corresponde a aproximadamente 50% do comprimento efetivo da rosca. A *zona de compressão ou plastificação* vem em seguida, possui profundidade decrescente e ocupa 30% do comprimento da rosca. E, no final, ocupando os 20% restantes do comprimento da rosca, está a *zona de transporte*. Novamente, essa zona possui profundidade constante. Existe também a possibilidade de se utilizar uma rosca de compressão zero (profundidade do canal constante) para evitar a geração de calor devido às taxas de compressão.

Para auxiliar e melhorar a capacidade de mistura e homogeneização da rosca, existem algumas seções misturadoras que podem ser incorporadas a ela. As mais utilizadas são rosca de barreira, pinos misturadores, misturador Maddock e rosca com misturador tipo abacaxi.



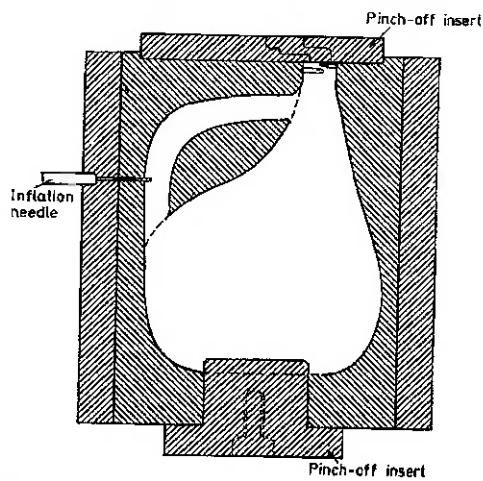
**Figura 10 Elementos misturadores da rosca: a. Abacaxi, b. Maddock, c. Pinos misturadores, d. Barreira**

## **8. UNIDADE DE SOPRO**

Como descrito anteriormente, a função da extrusora e de sua matriz é fornecer adequadamente à estação de moldagem um parison de propriedades dimensionais (espessura das paredes, diâmetro, temperatura e viscosidade) coerentes às especificadas. Esse parison, uma vez posicionado no molde já fechado, é então expandido por um sopro, ou sistema de inflação, da sua forma tubular para uma reprodução exata da superfície da cavidade do molde. O sistema de sopro ou inflação também é responsável por manter o parison inflado em contato com a superfície da cavidade do molde até que ele tenha sido suficientemente resfriado, e assim, não sofra alterações dimensionais. Além disso, o sistema de sopro permite a retirada do produto acabado.

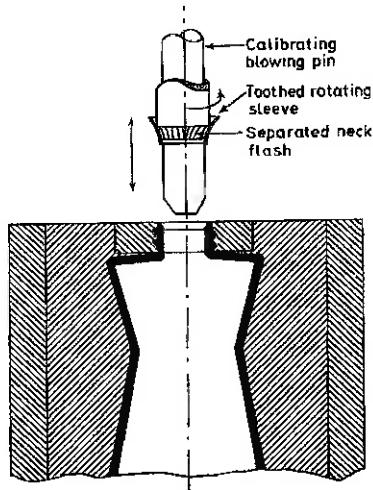
Os dois sistemas básicos de sopro são a inflação por agulha e a por mandril.

No primeiro sistema, o mecanismo mais básico é aquele no qual o sistema da agulha (uma ou mais) é colocado em uma das metades do molde, e após o fechamento do sistema de moldagem, a agulha penetra a parede e infla o parison por meio de gás pressurizado; a agulha, então, se retrai e o polímero, ainda pastoso, sela o orifício deixado pela agulha. Em outro método bastante comum, faz-se o produto com um prolongamento do gargalo para receber a agulha. Esse mesmo princípio é utilizado quando se molda componentes ligados pelo gargalo ou gargalo-fundo. Nessas situações, a agulha atravessa o parison na porção de material que será descartada, ou até nas junções. Esse sistema apresenta uma grande desvantagem na produção de componentes que exigem um gargalo de dimensões controladas, pois, como o parison é fechado duplamente, é necessária uma operação de acabamento secundária para se acertar a geometria do gargalo. Por outro lado, é o ideal para a produção de componentes que não possuem gargalo.



**Figura 11 Esquema do Sistema de Sopro por Agulha**

O sistema de sopro por mandril baseia-se em um mandril, conectado a um compressor de ar, que penetra no parison pela sua extremidade aberta (que assim permanecerá após a inflação). Esse sistema pode ser encontrado, basicamente, sob 3 configurações: sopro por baixo, por cima calibrado ou descalibrado. Nesses dois primeiros sistemas, o mandril também tem a função de calibrar, ou ajustar, as dimensões internas do gargalo do produto; as dimensões externas são dadas pelo próprio molde.



**Figura 12 Esquema do Sistema de Sopro por Mandril**

## **9. OPERAÇÕES AUXILIARES**

### ***9.1. Aquecimento da massa***

O aquecimento necessário para plastificar o material pode ser originado tanto das resistências de aquecimento do canhão como do esforço de girar a rosca. Assim sendo, a máquina deve ser operada de modo a minimizar a quantidade de calor friccional para evitar superaquecimento da massa e sua consequente degradação.

### ***9.2. Refrigeração***

Durante o processo de moldagem por sopro, é necessária a refrigeração do canhão, do bloco do funil, da rosca e do produto final.

No canhão, os sistemas de refrigeração mais utilizados são sopradores de ar ou ventiladores. Manter o bloco de funil na temperatura ideal permite que o material tenha livre acesso à zona de alimentação e, para isso, essa região é percorrida por água de refrigeração.

Já a rosca deve ser refrigerada para que o aumento da sua temperatura não dificulte a alimentação nem a mistura do material. Porém, como a medição da temperatura real da rosca é difícil, o cálculo da refrigeração necessária também não é exato. Conseqüentemente, pode-se ter um congelamento do material na camada superficial da rosca, dificultando a produção. Após o sopro, a refrigeração deve ser a mais rápida possível a fim de manter as dimensões do produto e evitar que ocorram defeitos na superfície ou alterações nas propriedades físicas.

### **9.3. Acabamento e decoração de artigos**

As operações de acabamento poderiam não existir se a moldagem por sopro produzisse componentes prontos para o uso. Nessas operações estão incluídas a remoção de rebarba do gargalo e do fundo, o alargamento da abertura do gargalo, a usinagem da face do selo e também a remoção do cavaco do recipiente. E, quando o produto final é resultado da união de dois ou mais subprodutos, faz-se necessário juntar ou soldar, de acordo com o grau de permanência dessa união.

Para a impressão de legendas no produto moldado, o processo mais utilizado é a serigrafia. Os processos de *letterflex* e *offset seca* são prejudicados pela difícil aderência da tinta à superfície do produto moldado, que é causada pela falta de grupos polares ativos nessa região. Hoje em dia já existem métodos químicos e físicos para se ativar essas superfícies, sendo o processo da chama o mais popular e versátil. Nesse processo, as chamas devem ser altamente oxidantes e estar em uma temperatura superior a 1000°C. A taxa de mistura de gás e ar, a quantia usada e a distância entre o produto e chama devem se controlados de acordo com a matéria-prima do produto e a tinta a ser utilizada.

Deve-se ressaltar que as operações de acabamento, bem como as de decoração, aumentam substancialmente o tempo de produção e o custo de moldagem. Assim sendo, devem ser utilizadas racionalmente.

**PARTE II: ANÁLISE DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DA  
MATERIAL-PRIMA**

## **10. PROPRIEDADES IMPORTANTES DOS POLÍMEROS**

As características do polímero a ser conformado são responsáveis por uma grande parcela do projeto da máquina transformadora e também pelo andamento do processo. Por essas razões, faz-se necessário conhecer as propriedades do material.

Os dois grandes grupos de propriedades do polímero são: as propriedades reológicas e as propriedades térmicas. O primeiro grupo descreve a deformação do material quando esse está submetido a uma determinada tensão; é dividido entre as propriedades reológicas do material a granel e em estado pastoso. O segundo grupo de propriedades permite que se descreva e se analise todo o histórico térmico pelo qual o material passa ao longo do processo.

### ***10.1. Propriedades Reológicas***

#### **10.1.1. Material a granel**

##### **Densidade ( $\rho_b$ )**

É a densidade das partículas do polímero, incluindo os espaços vazios entre elas. Materiais de baixa  $\rho_b$  tendem a causar problemas na zona de alimentação, pois a taxa de escoamento de massa é normalmente pequena e, assim sendo, a taxa de alimentação pode ser insuficiente para fornecer a quantidade mínima de material para as zonas seguintes da extrusora. É necessário conhecer como  $\rho_b$  se comporta com mudanças de pressão, pois os espaços vazios entre as partículas de polímero permitem que essas sofram um rearranjo, uma compactação.

##### **Coeficiente de Fricção ( $f$ )**

Pode ser dividido em f interno e externo. O coeficiente de fricção interno caracteriza-se como a resistência de uma camada de partículas à movimentação da camada adjacente do mesmo material. Já o coeficiente de fricção externo é a medida da resistência presente na interface entre as partículas de polímero e a parede do canhão ou da rosca (que são constituídos de outro material). Pode ser definido como a resistência tangencial ao movimento de escorregamento presente na interface entre dois materiais. Calcula-se esse coeficiente como a razão entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal na interface. É de difícil mensuração, e a maior parte dos valores até hoje apresentada não pode ser repetida com facilidade.

#### Tamanho e forma das partículas

As partículas poliméricas utilizadas na extrusão são de tamanhos muito variados, podendo ir de  $1\text{ }\mu\text{m}$  até 10 mm. E o tamanho das partículas influencia no tipo de escoamento do polímero em estado sólido. Os polímeros em pó tendem a ser muito coesivos e de difícil alimentação. Já quando o polímero é formado basicamente por partículas entre 1-5mm, o escoamento é favorecido. A forma das partículas do polímero influencia mais o coeficiente de fricção, tanto interno como externo. Os principais parâmetros na análise da forma das partículas são a área da superfície, o tamanho dos poros e o volume.

#### **10.1.2. Material Pastoso**

##### Taxa de Cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ )

É a diferença de velocidade por unidade de área normal à direção de escoamento. Quando se precisa descrever quantitativamente o escoamento do fluido, é necessário conhecer a taxa de cisalhamento em todos os pontos. Para isso, basta conhecer o perfil de velocidade do escoamento.

### Deformação por Cisalhamento ( $\gamma$ )

Deslocamento (na direção do escoamento) por unidade de distância normal durante um certo período de tempo. A relação entre a taxa de cisalhamento e a deformação por cisalhamento é dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{logo } \gamma = \int \dot{\gamma} dt \quad \text{Equação 2}$$

### Tensão de Cisalhamento ( $\tau$ )

É a tensão requerida para se conseguir um determinado tipo de deformação por cisalhamento. De uma outra maneira, pode-se dizer que, quando o fluido é cisalhado, uma certa força é necessária para causar a deformação. E a tensão de cisalhamento é a divisão dessa força pela área onde ela atua.

### Viscosidade de Cisalhamento ( $\eta$ )

É a resistência ao escoamento por cisalhamento. Quantitativamente, é determinada pela razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Equação 3}$$

### Power Law Index (n)

Índice que caracteriza um fluido não-newtoniano, aquele cuja viscosidade reduz com a taxa de cisalhamento.

$$\eta = \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{Equação 4}$$

Esse índice varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1, mais newtoniano é o comportamento do fluido. A maior parte dos polímeros (polipropileno, poliestireno e polietileno) tem  $n=0,5$ , ou seja, comportamento fortemente não newtoniano.

## ***10.2. Propriedades Térmicas***

### Condutividade Térmica (k)

É uma constante de proporcionalidade entre o fluxo de calor por condução e o gradiente de temperatura que causa esse fluxo de calor. Normalmente, a condutividade térmica dos polímeros é de 2 a 3 vezes menor que a dos metais. Isso limita em muito a taxa de aquecimento e plastificação dos polímeros, e durante o resfriamento, pode causar não-uniformidade durante esse processo além de encolhimento, tensões térmicas induzidas e deformações.

### Calor Específico (C)

É a quantidade de energia requerida para aumentar em  $1^{\circ}\text{C}$  uma unidade de massa. Pode ser medida a pressão constante  $C_p$  ou a volume constante  $C_v$ .

### Entalpia Específica ( $\hat{H}$ )

É definida pela seguinte relação:

$$\hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT \quad \text{Equação 5}$$

Se admitirmos que  $T_1$  é a temperatura ambiente e  $T_2$  a temperatura do processo, a entalpia específica indica a quantidade de energia requerida para executar esse aumento de temperatura.

### Difusidade Térmica ( $\alpha$ )

É uma propriedade térmica derivada da condutividade térmica, calor específico e densidade. A relação é:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

Equação 6

É muito utilizada em problemas de transferência de calor no período transiente.

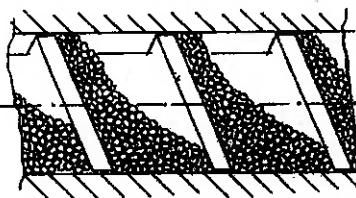
#### Tempo de Indução

Representa o tempo decorrido a uma certa temperatura em uma certa atmosfera antes que os efeitos de degradação do material sejam mensuráveis. De uma outra maneira, o tempo de indução indica por quanto tempo um polímero pode ser exposto a uma certa temperatura antes que comece a degradar.

## 11. ZONA DE ALIMENTAÇÃO

Em muitas análises de transporte de sólidos em extrusoras de rosca simples, o efeito da gravidade é assumido como desprezível durante o transporte pelo canhão. Enquanto o material está no canal da rosca, o movimento para frente é resultado do movimento relativo entre as fronteiras do sólido, isto é, entre a superfície do canal da rosca e a superfície do canhão. A taxa de escoamento do sólido é determinada pelas forças que atuam no sólido, sendo que essas são determinadas pelas forças de atrito atuantes na fronteira dos sólidos.

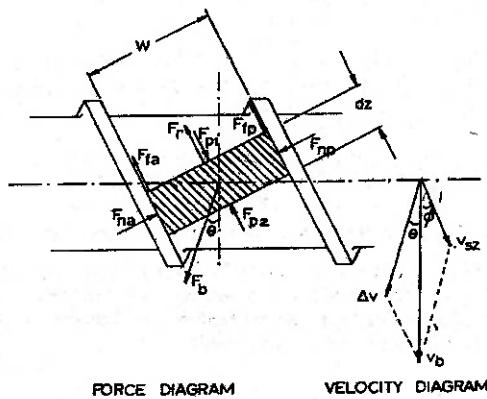
Foi descoberto experimentalmente que, em muitos casos, as partículas poliméricas sólidas se compactam rapidamente na porção inferior do canal da rosca. Nesse caso, não há deformação interna dentro do solid bed, bloco de partículas que se movem com a mesma velocidade. Essa compactação de partículas sólidas em um solid bed ocorre somente se existir uma quantidade suficiente de pressão no canal da rosca. Para isso, é necessário que o canal da rosca esteja completamente preenchido, permitindo que o plug-flow se instale (escoamento no qual todas as partículas se movem com a mesma velocidade). Se a pressão existente não for suficiente para a compactação, haverá deformação interna e como consequência, o processo de alimentação será menos estável. Esse tipo de escoamento que ocorre quando o canal não está totalmente preenchido pelas partículas de polímero é conhecido como “transporte de Arquimedes”. Em alguns casos, o transporte de Arquimedes ocorre accidentalmente, quando, por exemplo, a taxa de escoamento pela alimentadora é muito baixa ou a entrada do alimentador é muito pequena. Pode ocorrer também quando a pressão na parte final da zona de alimentação é baixa.



**Figura 13 Esquema do Transporte de Arquimedes**

### 11.1. Modelo Físico e Matemático

A aproximação comumente utilizada para a análise da alimentação é considerar um elemento do solid bed no canal da rosca e determinar todas as forças que nele atuam. As forças mais importantes são as de atrito nas fronteiras do polímero com a rosca e o canhão e aquelas resultantes de gradientes de pressão no solid bed. Nessa análise, a rosca é considerada estacionária e o canhão, rotativo. Além disso, denomina-se filete ativo aquele que antecede o movimento da rosca (anterior ao solid bed), e passivo aquele que é posterior ao solid bed.



**Figura 14 Diagramas de Força e Velocidade de elemento do solid bed no canal da rosca**

$F_r$ : força de atrito entre o solid bed e a raiz da rosca

$$F_r = PWdzf_s \quad \text{Equação 7}$$

$F_{na}$ : força normal no solid bed no filete ativo

$$F_{na} = PHdz + F^* \quad \text{Equação 8}$$

$F_{np}$ : força normal no solid bed no filete passivo

$$F_{np} = PHdz \quad \text{Equação 9}$$

$F_{fa}$ : força de atrito entre o solid bed e o flanco do filete ativo

$$F_{fa} = F_{na} f_s$$

Equação 10

$F_{fp}$ : força de atrito entre o solid bed e o flanco do filete passivo

$$F_{fp} = PHdzf_s$$

Equação 11

$F_{pl}$ : força contra o solid bed resultante da pressão local

$$F_{pl} = WHP$$

Equação 12

$F_{p2}$ : força contra o solid bed resultante da pressão local  $P+dP$

$$F_{p2} = WH(P + dP)$$

Equação 13

(Obviamente, se o gradiente de pressão na direção de descida do canal é zero,  $F_{p1}=F_{p2}$ )

$F_b$ : força de atrito resultante do contato entre o solid bed e o canhão

$$F_R = PWdzf_b$$

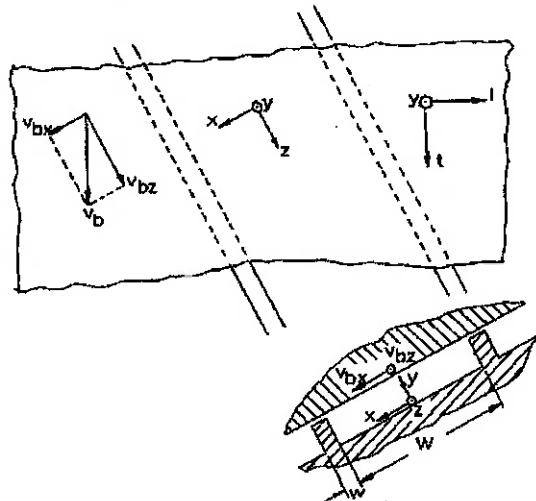
Equação 14

A direção de  $F_b$  é dada pela velocidade resultante da diferença vetorial entre a velocidade do canhão e do solid bed. O ângulo  $\theta$ , que define a direção de  $F_b$ , é conhecido como ângulo do alimentação.

Até agora, ainda existem duas incógnitas: o ângulo  $\theta$  e a força extra  $F^*$ , presente na força  $F_{na}$ . Para contornar essa situação, é realizado o balanço de forças e momento, nas direções axiais e tangenciais, respectivamente. A soma das forças na direção axial deve ser nula, pois se admite que a aceleração seja desprezível. Já na direção tangencial, o balanço de torque também é considerado nulo, pois o torque líquido também é zero. Como resultado desse balanço, a força extra  $F^*$  é eliminada e consegue-se uma expressão complexa para o ângulo  $\theta$ .

Para se conseguir expressões simplificadas para  $F^*$  e  $\theta$ , admite-se a hipótese de que o canal da rosca pode ser desenrolado em uma superfície plana. Essa simplificação baseia-se no fato de que na maioria das roscas, o diâmetro é muito maior que a profundidade do canal ( $D/H >> 1$ , usualmente 10), e as mudanças na largura do canal e o ângulo de hélice ao longo da profundidade do canal são muito pequenas. Assim sendo, pode-se considerar desprezível a curvatura do canal. (O erro que se comete com essa simplificação é relativamente

insignificante, considerando-se as limitações quanto à precisão e reproduutibilidade dos dados existentes para os coeficientes de atrito).



**Figura 15 Modelo da Superfície Plana**

E, a partir dessa hipótese, pode-se fazer três afirmações:

1) a largura do canal e o ângulo de hélice são constantes ao longo da profundidade do canal;

2) a força extra  $F^*$  pode ser calculada diretamente através de um balanço de forças na seção transversal do canal;

$$F^* = F_b \sin(\theta + \varphi) \quad \text{Equação 15}$$

3) o ângulo de alimentação pode-se também calcular através do balanço de forças na direção de descida do canal;

$$\theta = \arcsin \left[ \frac{(1 + f_s^2 - k^2)^{\frac{1}{2}} - f_s k}{1 - f_s^2} \right] - \varphi \quad \text{Equação 16}$$

$$\text{onde } k = \frac{H}{f_b z} \ln \frac{P}{P_0} + \frac{f_s}{f_b} \left( 1 + \frac{2H}{W} \right)$$

De posse das velocidades do canhão ( $\overrightarrow{V_b}$ ), do solid bed ( $\overrightarrow{V_{sz}}$ ), e consequentemente da diferença entre elas ( $\overrightarrow{\Delta V}$ ), pode-se calcular a taxa de alimentação ( $\dot{M}_s$ ), multiplicando-se a velocidade do solid bed pela sua densidade e pela área que será percorrida.

$$\overrightarrow{\Delta V} = \overrightarrow{V_b} - \overrightarrow{V_{sz}} \quad \text{Equação 17}$$

$$\overrightarrow{V_{sz}} = V_b \frac{\sin \theta}{\sin(\theta - \varphi)} \quad \text{Equação 18}$$

$$\dot{M}_s = \rho H p W V_{sz} \quad \text{Equação 19}$$

onde  $\rho$  é a densidade do solid bed e  $p$  o número de filetes paralelos.

## 11.2. Algumas considerações sobre o perfil de pressão em função de $z$

Possuindo a taxa de alimentação e o ângulo de alimentação, pode-se determinar o perfil de pressão ao longo do canal:

$$P(z) = P_0 \exp \left[ \left( f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right) - f_s \left( \frac{W + 2H}{W} \right) \frac{z}{H} \right] \quad \text{Equação 20}$$

Pode-se perceber por essa expressão que o termo exponencial cresce com  $f_b$ , enquanto diminui com o  $f_s$ . Além disso, o aumento da pressão será maior se  $f_b$  for alto e  $f_s$  pequeno. E, com o termo exponencial é inversamente proporcional a

H, a pressão irá aumentar mais lentamente como aumento da profundidade do canal.

### ***11.3. Algumas considerações sobre as forças de atrito no solid bed***

A força de atrito no canhão é responsável por evitar a rotação livre do solid bed, ou seja, obriga-o a se movimentar juntamente com o canhão. Já a força de atrito na superfície da rosca é contrária ao movimento do material. Se essa força for zero, tem-se o máximo transporte para frente. E, as equações 20, 21 e 22 fornecem o máximo ângulo de alimentação, a máxima velocidade do solid bed e também a máxima taxa de alimentação, respectivamente.

$$\theta_{MÁX} = \frac{\pi}{2} \quad \text{Equação 21}$$

$$V_{SZ-MÁX} = \frac{V_b}{\cos \varphi} \quad \text{Equação 22}$$

$$\dot{M}_{SZ-MÁX} = \frac{\rho W H V_b}{\cos \varphi} \quad \text{Equação 23}$$

Alterando-se a temperatura do canhão e da rosca, seus coeficientes de atrito irão se modificar também. Assim, pequenas mudanças na temperatura da seção de alimentação devem causar um grande efeito no desempenho total da extrusora. O ideal seria regular a temperatura do canhão de forma a obter  $f_b$  máximo e, na rosca, aquela que forneça o mínimo  $f_s$ . Deve-se lembrar que a influência da temperatura na zona de alimentação é a maior da extrusora, devendo então ser regulada atenciosamente.

### ***11.4. Algumas considerações sobre Geração de Calor por atrito***

A geração de calor por atrito ocorre na zona de alimentação e, como resultado disso, a temperatura na interface entre o solid bed e o canhão pode ser substancialmente maior que a temperatura fixada para o canhão.

Em qualquer movimento de escorregamento no qual uma força de atrito está em funcionamento, existe a geração de calor por atrito entre os corpos envolvidos. A taxa de geração de calor por atrito pode ser calculada a partir do produto entre a força de fricção e a velocidade relativa:

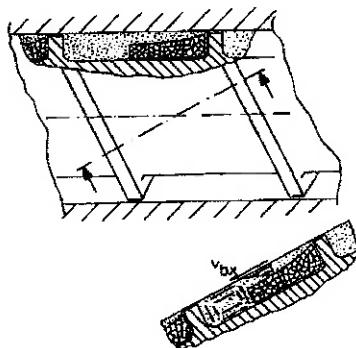
$$\dot{Q} = F_f \Delta V = f F_n \Delta V \quad \text{Equação 24}$$

O calor gerado por atrito na superfície do canhão é dissipado em dois fluxos principais: por condução pela parede do canhão e para dentro do solid bed. O perfil de temperatura do solid bed depende fortemente do fluxo de calor para a parede do canhão. Assim sendo, quanto melhor for o processo de refrigeração do canhão, maior será o fluxo de calor conduzido para o meio ambiente por esse elemento. Dessa forma, o aumento da temperatura na interface é mais lento, aumentando assim o tamanho da zona de alimentação (essa zona acaba quando a temperatura da interface atinge a temperatura de fusão do material e surge um filme de material fundido entre o solid bed e a superfície do canhão).

## 12. ZONA DE PLASTIFICAÇÃO

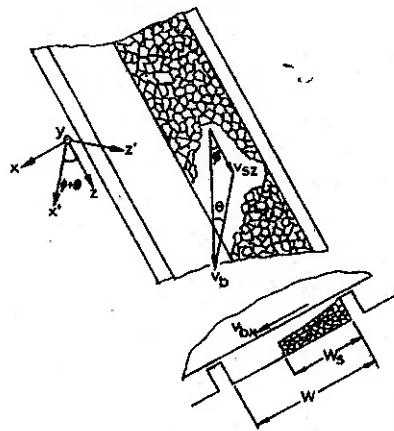
A segunda zona funcional da extrusora é a de plastificação ou de fundição. Essa zona se inicia tão logo o plástico fundido apareça. Como a maior parte da geração de calor por atrito ocorre na interface canhão-solid bed, os primeiros traços de plastificação aparecem nessa região. Não necessariamente, o processo de plastificação se inicia no lugar no qual a temperatura medida no canhão atinge a temperatura de fusão, pois, como já foi dito anteriormente, a temperatura da interface canhão-solid bed é normalmente um pouco diferente da regulada para o canhão. Na realidade, a plastificação pode se iniciar sem nenhum aquecimento externo, simplesmente pela ação do atrito e a conseqüente geração de calor.

### 12.1. *Modelo Tadmor de Plastificação*



**Figura 16 Modelo de Tadmor**

Assume-se que a rosca seja estacionária. Em uma seção transversal perpendicular aos filetes da rosca, o canhão move o filete ativo a uma velocidade de  $V_{bx}$ , parcela da velocidade  $V_b$ . Como resultado desse movimento, o fino filme de plástico fundido, localizado entre o solid bed e o canhão, é cisalhado a altas taxas. Com isso, ocorre uma grande geração viscosa de calor.



**Figura 17 Diagrama de velocidade e sistema de coordenadas utilizados**

Devido à pequena espessura do filme, o efeito do gradiente de pressão sobre o perfil de velocidade é muito baixo. Assim sendo, o escoamento será essencialmente causado por arrasto e a taxa de cisalhamento e a geração de calor serão relativamente uniformes ao longo da profundidade do filme.

Com o prosseguimento da plastificação, a área transversal do solid bed será reduzida enquanto a área transversal da piscina de massa fundida crescerá. Essa exerce pressão considerável sobre o solid bed, que tem sua largura reduzida, enquanto o filme entre o solid bed e o canhão permanece praticamente inalterado.

## 12.2. *Fontes de Energia para plastificação*

Existem basicamente duas fontes de energia utilizadas para a plastificação em uma extrusora. A primeira e mais importante é a energia mecânica fornecida pela rosca que é transformada em calor por um processo de geração viscosa. A segunda fonte de energia é o calor fornecido pelos aquecedores externos do canhão, e possíveis aquecedores da rosca. A energia fornecida pela rosca é dissipada primeiramente no filme de plástico fundido. E a geração viscosa de calor resultante é relativamente uniforme através do material. Assim, o aumento

da temperatura no polímero fundido será relativamente uniforme e a distância para transferência de calor será pequena. Por outro lado, a energia fornecida pelos aquecedores do canhão tem que ser conduzida através de toda a parede do canhão e também através do filme da massa fundida antes de chegar ao solid bed.

Durante o processo de transferência de calor, ocorrem consideráveis perdas de calor por condução, convecção e por radiação. Outro considerável problema é a baixa condutividade térmica dos polímeros, que diminui a intensidade do fluxo de calor. Todo esse processo de transferência de calor pode ser acelerado aumentando-se a temperatura do canhão; deve-se, no entanto, observar os limites de degradação térmica do material.

### ***12.3. Determinação da Taxa de Plastificação***

Para ser capaz de prever a taxa de plastificação, a quantidade de calor escoando através da interface sólido-fundido deve ser conhecida. Isso pode ser determinado se o perfil de temperatura no filme de material fundido e no solid bed é conhecido. O perfil de temperatura no filme pode ser determinado a partir do seu perfil de velocidade. Para se determinar uma expressão para aquele perfil, as seguintes hipóteses são feitas:

- 1) O processo é estacionário;
- 2) A densidade do polímero fundido e a sua condutividade térmica são constantes;
- 3) A transferência de calor por convecção é desprezível;
- 4) Transferência de calor por condução só na direção normal a interface;

A partir dessas 4 hipóteses, a equação geral da energia pode ser simplificada para:

$$k_m \frac{d^2T}{dy^2} + \mu \left( \frac{\Delta V}{H_m} \right)^2 = 0 \quad \text{Equação 30}$$

Utilizando-se as condições de contorno  $T(0)=T_m$  e  $T(H_m)=T_b$ , a dupla integração fornece um perfil de temperatura quadrático, apresentado na equação seguinte:

$$T(y) = \left( -\frac{\mu \Delta V^2}{2k_m H_m^2} \right) y^2 + \left( \frac{2k_m \Delta T_b + \mu \Delta V^2}{2k_m H_m} \right) y + T_m \quad \text{Equação 31}$$

onde  $\Delta T_b = T_b - T_m$ .

Da equação anterior, pode-se determinar o fluxo de calor na interface utilizando-se a lei de Fourier:

$$-\dot{q}_m = \frac{-\dot{Q}_{in}}{A} = k_m \frac{dT(0)}{dy} = \frac{2k_m \Delta T_b + \mu \Delta V^2}{2H_m} \quad \text{Equação 32}$$

Da mesma maneira, pode-se determinar o fluxo de calor da interface no solid bed:

$$-\dot{q}_{out} = \frac{-\dot{Q}_{out}}{A} = k_s \frac{dT(0)}{dy} = \rho_s C_s V_{sy} \Delta T_r \quad \text{Equação 33}$$

Para a determinação do perfil de temperatura do solid bed, utiliza-se a equação de energia aplicada a um corpo sólido em movimento:

$$\rho_s C_s V_{sy} \frac{dT}{dy} = k_s \frac{d^2T}{dy^2} \quad \text{Equação 34}$$

E, integrando-se duas vezes a equação anterior com as condições de contorno  $T(0)=T_m$  e  $T(-\infty)=T_r$ , tem-se:

$$T(y) = \Delta T_r \exp \left( \frac{y V_{sy}}{\alpha_s} \right) + T_r \quad \text{Equação 35}$$

onde  $\Delta T_r = T_r - T_m$ .

A temperatura de referência  $T_r$  é normalmente a temperatura na qual a matéria-prima é introduzida na extrusora. Isso é valido assumindo-se que somente uma pequena parcela do material está sofrendo aquecimento.

Com o perfil de temperatura do filme e do solid bed determinados, pode-se calcular a taxa de plastificação a partir do balanço de calor na interface. O calor utilizado para plastificar o material na interface é determinado pela diferença entre o fluxo de calor de entrada e saída da interface.

$$\dot{M}_1 = \frac{2k_m \Delta T_b + \mu \Delta V^2}{2H_m} - \rho_s C_s V_{sy} \Delta T_r \quad \text{Equação 36}$$

A partir dessa equação e da definição de taxa de plastificação (Equação 37), pode-se também conseguir a velocidade de plastificação  $V_{sy}$ :

$$\dot{M}_1 = V_{sy} \rho_s \Delta H_f \quad \text{Equação 37}$$

$$V_{sy} = \frac{2k_m \Delta T_b + \mu \Delta V^2}{2\rho_s H_m \Delta H} \quad \text{Equação 38}$$

onde  $\Delta H = \Delta H_f + C_s \Delta T_r$  (variação de entalpias).

#### 12.4. Consumo de Potência

O consumo de potência mecânica na zona de plastificação pode ser analisado em três partes distintas: o consumo de potência no filme de material plastificado; o consumo de potência na piscina de material plastificado; e o consumo de potência na folga entre o filete e o canhão.

A primeira parcela pode ser descrita por:

$$dZ_{mf} = V_b dz \int_0^{W_s} (\tau_{yz} \sin \theta + \tau_{yx} \cos \theta) dx \quad \text{Equação 39}$$

onde  $\tau_{yx}'$  é a tensão de cisalhamento na direção x' da velocidade relativa  $\Delta V$  entre o solid bed e o canhão. Se admitirmos o material como sendo power law fluid, a tensão de cisalhamento pode ser escrita como:

$$\tau_{yx'} = m \left( \frac{dV_x'}{dy} \right)^n \quad \text{Equação 40}$$

$$\tau_{yz'} = m \left( \frac{dV_z'}{dy} \right)^n \quad \text{Equação 41}$$

Assumindo que o escoamento no filme seja um escoamento por arrasto, ou seja, os gradientes de pressão são desprezíveis, as equações anteriores tomam a seguinte forma:

$$\tau_{yx'} = m \left( \frac{\Delta V}{H_m} \right)^n \quad \text{Equação 42}$$

$$\tau_{yz'} = 0 \quad \text{Equação 43}$$

Retomando a expressão da espessura do filme, pode-se reescrever a equação do consumo de potência no filme (Equação 39) como se segue:

$$dZ_{mf} = m V_b dz' \Delta V^n \cos \theta \int_0^{W_s} \frac{dx'}{(K_4 x' + \delta^2)^n} \quad \text{Equação 44}$$

$$\text{onde } K_4 = \frac{4k_m \Delta T_b + 4B_3}{\rho_m \Delta v \Delta H} \quad \text{Equação 45}$$

Reescrevendo a equação em termos de  $H_m$ , obtém-se:

$$dZ_{mf} = m V_b dz' \Delta V^n \cos \theta \int_{\delta}^{H_m} \frac{2H_m^{1-n}}{K_4} dH_m \quad \text{Equação 46}$$

Realizando, então, a integração e retornando ao sistema de coordenadas (x,y,z) pela expressão  $z' = z \sin(\theta + \varphi)$ , consegue-se a expressão final para o consumo de potência no filme de material plastificado:

$$dZ_{mf} = m V_b dz \sin(\theta + \varphi) \cos \theta \frac{2\Delta V^n}{K_4(2-n)} (H_m^{2-n} - \delta^{2-n}) \quad \text{Equação 47}$$

O consumo de potência na piscina de polímero plastificado é quantificado aproximando-o a um canal de rosca de largura  $W_m = W - W_s$  (de acordo com figura 7) com fluido newtoniano. Isso porque a configuração de escoamento dessa

região é relativamente complicada, dificultando a utilização do modelo de power law fluid. Assim sendo, tem-se a seguinte expressão para a segunda parcela de consumo de potência na zona de plastificação:

$$dZ_{mp} = (1 + 3r_d + 4 \tan^2 \phi) \frac{p \mu W_m V_{bz}^2 dz}{H} \quad \text{Equação 48}$$

onde  $r_d$  é a razão do escoamento por pressão pelo escoamento por arrasto, dado pela expressão a seguir.

$$r_d = \frac{H^2 g_z}{6 \mu V_{bz}} \quad \text{Equação 49}$$

Determina-se a última parcela assumindo que o perfil de velocidade na folga é dominado pelo escoamento de arrasto. Assim, o consumo de potência na folga do filete é calculado por:

$$dZ_{cl} = \frac{p V_b^{1+n}}{\delta^n} \quad \text{Equação 50}$$

E, dessa forma, o consumo total de potência nessa zona funcional da extrusora é dado por:

$$Z_t = Z_{mf} + Z_{mp} + Z_{cl} \quad \text{Equação 51}$$

## 13. ZONA DE TRANSPORTE

A zona de transporte de material plastificado inicia-se no lugar no qual o processo de plastificação se completa. Essa região da extrusora também é conhecida como zona de bombeamento, pois, em muitos casos, o polímero plastificado deve ser transportado através da matriz enfrentando uma considerável pressão.

Pode-se modelar o fluido nessa região de 2 maneiras, que diferem principalmente pela complexidade da análise: fluido newtoniano e fluido power law. A princípio, será aqui adotada a primeira aproximação.

Para a modelagem dessa zona de transporte, fazem-se as seguintes hipóteses:

- 1) O fluido é newtoniano;
- 2) O escoamento é estacionário;
- 3) Não há escorregamento na parede;
- 4) As forças de inércia e peso são desconsideráveis;
- 5) A largura do canal pode ser considerada infinita;
- 6) A curvatura do canal é desconsiderável (modelo da Superfície Plana);

E, por todas essas hipóteses, a geometria do simplifica-se a apresentada na figura

15.

Assim sendo, a equação do movimento na direção de descida do canal é escrita como se segue:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = g_z = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad \text{Equação 52}$$

A pressão é função somente da coordenada  $z$ . Dessa forma, a equação anterior pode ser integrada para fornecer o perfil da tensão de cisalhamento na direção radial ( $y$ ):

$$\tau_{yz} = \tau_0 + g_z y \quad \text{Equação 53}$$

onde  $\tau_0$  é a tensão de cisalhamento na superfície da rosca.

Para um fluido newtoniano, a tensão de cisalhamento pode ser escrita como:

$$\tau_{yz} = \mu \frac{dV_z}{dy} \quad \text{Equação 54}$$

Dessa maneira, a equação 53 assume a seguinte forma:

$$\mu \frac{dV_z}{dy} = \tau_0 + g_z y \quad \text{Equação 55}$$

A partir da integração da equação anterior, consegue-se determinar o perfil de velocidades na direção z, utilizando as condições de contorno  $V_z(0)=0$  e  $V_z(H)=V_{bz}$ , apresentado na equação seguinte:

$$V_z(y) = \left( \frac{V_{bz}}{H} - \frac{g_z H}{2\mu} \right) y + \frac{g_z}{2\mu} y^2 \quad \text{Equação 56}$$

Com esse perfil de velocidade, consegue-se a taxa de escoamento na direção z integrando  $V_z(z)$  multiplicada pela área transversal do canal da rosca:

$$\dot{V} = \int_0^H p W V_z dy = \frac{1}{2} p W H V_{bz} - \frac{p W H^3 g_z}{12\mu} \quad \text{Equação 57}$$

Essa taxa de escoamento nada mais é do que a taxa volumétrica de saída da zona de transporte, podendo também representar a taxa de produção de uma extrusora.

O primeiro termo representa a taxa de escoamento induzido pelo arrasto, enquanto o segundo é a taxa causada pelo gradiente de pressão. Analisando esses dois termos, percebe-se que a parcela causada pelo gradiente de pressão sofre uma influência da profundidade do canal da rosca (é proporcional ao cubo dessa grandeza) muito maior que o outro termo, que é inversamente proporcional a profundidade do canal. Assim sendo, essa região é normalmente projetada bem rasa. Outra observação a ser feita é que o termo de arrasto é independente de qualquer propriedade do fluido que está sendo transportado.

Segundo o mesmo procedimento empregado para a velocidade na direção z, pode-se determinar o perfil de velocidade na direção de x:

$$V_x(y) = \left( \frac{V_{bx}}{H} - \frac{g_x H}{2\mu} \right) y + \frac{g_x}{2\mu} y^2 \quad \text{Equação 58}$$

onde  $g_x$  é dado pela expressão:

$$\int_0^H V_x dy = 0 \quad \text{Equação 59}$$

$$g_x = \frac{6\mu V_{bx}}{H^2} \quad \text{Equação 60}$$

Até esse instante, o efeito do vazamento de fluxo através da folga do filete na taxa de produção da extrusora é desconsiderada. No entanto, essa parcela de escoamento é uma importante fonte de erro. E, para avaliar essa influência, é necessário determinar uma expressão para o escoamento na folga radial do filete.

Uma expressão significativamente simples, que satisfaz o objetivo anteriormente descrito, é conseguida admitindo-se que a folga radial do filete seja um canal de largura  $\pi D \cos \varphi$ , altura  $\delta$ , profundidade  $w$ , com um diferencial de pressão ao longo do filete de  $\Delta P_f$ . Utilizando expressões tabeladas para esse tipo de canal, consegue-se a expressão seguinte:

$$\dot{V}_f = \frac{\pi D \cos \varphi \delta^3}{12\mu_{cl}} \frac{\Delta P_f}{w} + \frac{pw\delta^3}{12\mu_{cl}} g_z \quad \text{Equação 61}$$

O diferencial de pressão ao longo do filete de  $\Delta P_f$  é resultado tanto do gradiente pressão  $g_z$  (direção de descida do canal) como do gradiente  $g_x$  (direção transversal do canal). A composição desses dois gradientes para obter  $\Delta P_f$  é dada a seguir:

$$\Delta P_f = g_z \frac{\pi D \cos \varphi}{p} + g_x W \quad \text{Equação 62}$$

Substituindo as equações 60 e 62 na equação 61, que descreve o fluxo através da folga radial do filete, consegue-se a sua expressão final:

$$\dot{V}_f = \frac{\pi D \cos \varphi \delta^3}{12 \mu_{cl} w} \left( \frac{\pi D g_z \cos \varphi}{p} + \frac{6 \mu v_{bx} W}{H^2} \right) + \frac{p w \delta^3}{12 \mu_{cl}} g_z \quad \text{Equação 63}$$

Assim, a expressão final para a taxa de produção da extrusora, que considera o efeito da folga radial, é:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} p W H V_{bz} - \frac{p W H^3 g_z}{12 \mu} - \left[ \frac{\pi D \cos \varphi \delta^3}{12 \mu_{cl} w} \left( \frac{\pi D g_z \cos \varphi}{p} + \frac{6 \mu v_{bx} W}{H^2} \right) + \frac{p w \delta^3}{12 \mu_{cl}} g_z \right] \quad \text{Equação 64}$$

Em posse dos perfis de velocidade do canal, pode-se calcular o consumo de potência nessa região:

$$dZ_{ch} = p V_{bz} dz \int_0^W \tau_{yz}(H) dx + p V_{bx} dz \int_0^W \tau_{yx}(H) dx \quad \text{Equação 65}$$

E, como o fluido é newtoniano, as tensões de cisalhamento podem ser calculadas por:

$$\tau_{yx}(H) = \mu \frac{dV_x}{dy}_H \quad \text{Equação 66}$$

$$\tau_{yz}(H) = \mu \frac{dV_y}{dx}_H \quad \text{Equação 67}$$

Assim, a expressão final para o consumo de potência no canal é:

$$dZ_{ch} = (1 + 3r_d + 4 \tan^2 \varphi) \frac{p \mu W V_{bz}^2 dz}{H} \quad \text{Equação 68}$$

( $r_d$  de acordo com equação 49).

Da mesma maneira que durante a análise da taxa de produção da extrusora, também se faz necessário considerar o efeito da folga radial do filete na determinação do consumo de potência. Assim sendo, o consumo de potência total na zona de transporte de uma extrusora é dado por:

$$dZ_t = dZ_{ch} + dZ_{cl}$$

Equação 69

onde

$$dZ_{cl} = \frac{Pv_b^2 \mu_{cl} w dz}{\delta}$$

Equação 70

## **14. PROJETO DA ROSCA DA EXTRUSORA**

O elemento mecânico mais importante de uma extrusora é a sua rosca. Um projeto adequado da geometria da rosca é de crucial importância para o perfeito funcionamento de uma extrusora. Se a geometria imprópria da rosca causa instabilidades durante o transporte do material, nem o mais sofisticado sistema de controle computacional pode solucionar o problema.

### ***14.1. Considerações Mecânicas***

Antes de otimizar qualquer um dos fatores geométricos da rosca, é necessário garantir que esse elemento tenha resistência mecânica suficiente para suportar a tensão imposta pelo processo de transporte de material na extrusora. Assim sendo, verificar-se-á esse elemento mecânico quanto à resistência à torção da sua raiz e à resistência do seu filete.

#### **14.1.1. Resistência à Torção da Raiz da Rosca**

Para garantir a transmissão do torque do motor para o material a ser preparado, a rosca deve ser dimensionada (diâmetro e profundidade do canal) tal que, em nenhum ponto da sua estrutura, a máxima tensão de cisalhamento ultrapasse a tensão admissível do material.

A região mais crítica quanto à tensão de cisalhamento é da zona de alimentação. Essa região é a que possui a seção transversal de menor área e também é aquela responsável por transmitir todo o torque vindo do motor. Para se calcular a tensão de cisalhamento de um ponto qualquer da rosca, deve-se, primeiramente, conhecer o torque nela atuante. Para isso, é necessário determinar a potência transmitida à rosca:

$$Z_{Rosca} = Z_{Motor} \varepsilon_{Motor} \varepsilon_{Transmissão}$$

Equação 71

E, a partir da potência da rosca, calcula-se o torque:

$$T = C \frac{Z_{Rosca}}{N}$$

Equação 72

Assim sendo, a tensão de cisalhamento nela atuante, que é função da distância radial, é:

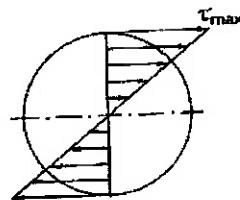
$$\tau = \frac{2Tr}{\pi R^3} = \frac{Tr}{J}$$

Equação 73

onde  $T$  é o torque atuante na rosca,

$R$  é o diâmetro externo da rosca,

$r$  é a variável de valores  $0 < r < R$  que mede a distância radial.



**Figura 18 Distribuição de Tensões em um eixo**

Sabendo que a máxima tensão ocorre na superfície externa da rosca, e que essa tensão não deve ultrapassar o limite admissível do material, chega-se ao mínimo raio da rosca:

$$R > \left( \frac{2T}{\pi \tau_a} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Equação 74

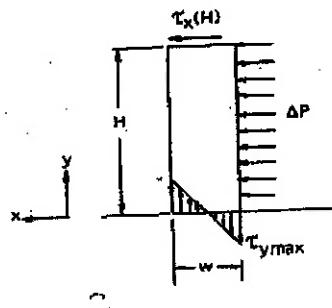
Com esse valor limite do raio, pode-se determinar o máximo valor da profundidade do canal nessa região:

$$H_{Max} = \frac{1}{2} D - \left( \frac{2T}{\pi \tau_a} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Equação 75

#### 14.1.2. Resistência do Filete da Rosca

Cada filete da rosca é submetido a um carregamento de duas fontes diferentes. A primeira delas é o diferencial de pressão  $\Delta P$  entre os seus lados. A segunda fonte de carregamento é a tensão de cisalhamento atuando no topo do filete, resultante do fluxo de material plastificado pela folga.



**Figura 19 Tensões atuantes no filete da Rosca**

Como resultado das tensões atuantes no filete da rosca, surge uma distribuição normal de tensão no filete, que atinge seu maior valor na superfície da rosca. O torque resultante dessa distribuição de tensão normal anula o torque resultante de  $\tau_x$  e  $\Delta P$ . Seja, então,  $\tau_{y\max}$  a máxima tensão normal no filete. O balanço de torque por unidade de comprimento do filete fornece esse valor, como apresentado nas equações seguintes:

$$\frac{1}{6} w^2 \tau_{y\max} = \frac{1}{2} H^2 \Delta P + Hw \tau_x(H) \quad \text{Equação 76}$$

$$\tau_{y\max} = \frac{3H^2 \Delta P}{w^2} + \frac{6H\tau_x(H)}{w} \quad \text{Equação 77}$$

A tensão de cisalhamento  $\tau_x$  também atinge seu máximo valor na superfície do filete, e seu valor  $\tau_{x\max}$  pode ser calculado a partir do balanço de forças na direção x, como mostram as equações seguintes:

$$w\tau_{x\max} = w\tau_x(H) + H\Delta P$$

Equação 78

$$\tau_{x\max} = \tau_x(H) + \frac{H}{w}\Delta P$$

Equação 79

Pelo critério de Von Mises, a tensão resultante da combinação das tensões máximas normal e de cisalhamento deve ser menor que a tensão admissível do material, conforme explicitado na equação a seguir:

$$\tau_{Comb} = \left( \tau_{y\max}^2 + 3\tau_{x\max}^2 \right)^{\frac{1}{2}} < \tau_a$$

Equação 80

Substituindo-se as equações 53 e 55 na anterior e desprezando a parcela da tensão de cisalhamento máxima causada por  $\tau_x(H)$ , consegue-se o máximo valor para a razão  $\frac{H}{w}$ :

$$\frac{H}{w} < \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{4} + \frac{\tau_a^2}{\Delta P^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{6} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Equação 81

#### 14.2. Otimização quanto ao consumo de potência

Em alguns casos, otimizar o consumo de potência pode ser mais importante que qualquer outro fator. Nesse caso, se o consumo de potência for excessivo, pode-se ter um aumento de temperatura e, consequentemente, aumentar as chances de degradação do material.

A geometria da rosca que resulta no menor consumo de potência pode ser determinada a partir das expressões de consumo de potência desenvolvidas anteriormente.

Quando se pretende otimizar o consumo de potência, não se deve esquecer que se objetiva um mínimo consumo de energia para um determinado nível de taxa de saída. Assim sendo, o consumo de potência é ótimo quando a razão entre o consumo de potência e a saída atinge um mínimo. Essa razão será conhecida, a partir de agora, como Consumo Específico de Energia (SEC). Esta é

a energia mecânica gasta por massa de material e é usualmente expressa em kWh/kg. Um alto nível de SEC mostra que uma grande quantidade de energia é gasta por massa de polímero; isso irá resultar em um grande aumento da temperatura do polímero e sua possível degradação.

As características geométricas da rosca que serão otimizadas a partir da SEC são: Ângulo de Hélice, Profundidade do Canal, Largura e Folga Radial do Filete.

Para se obter as características geométricas ótimas da rosca, analisar-se-á, para cada uma, a seguinte relação:

$$SEC = \frac{Z}{V} \quad \text{Equação 82}$$

$$\frac{\partial(SEC)}{\partial a} = 0 \quad \text{Equação 83}$$

$$\frac{\partial \left( \frac{Z}{V} \right)}{\partial a} = 0 \quad \text{Equação 84}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial a} \frac{\dot{V}}{V} = Z \frac{\partial \dot{V}}{\partial a} \quad \text{Equação 85}$$

onde  $a$  assume o papel do ângulo de hélice, profundidade do canal, largura e folga radial do Filete.

**PARTE III: IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS FUNÇÕES  
DE OTIMIZAÇÃO**

## **15.IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO**

As equações que representam o consumo de potência nas zonas funcionais de uma extrusora, e que foram apresentadas nas seções anteriores, podem ser expressas sob a forma alternativa  $f(x) = 0$ . Para resolver esse tipo de equação, ou seja, determinar os zeros da função, foi escolhido o Método Iterativo de Newton-Raphson. Essa metodologia é apresentada na seção 15.1.

Para confirmar a validade desses modelos matemáticos e também da própria implementação computacional do processo de otimização (em anexo), aplicou-se os exemplos da bibliografia [1]. A partir da seção 15.2, esses testes e seus resultados estão apresentados.

### ***15.1. Método de Newton-Raphson***

O método de Newton Raphson é baseado na expansão da Série de Taylor. A expansão de série de Taylor para um sistema de uma função e uma incógnita, quando a variável incógnita se aproxima da raiz da função é:

$$y \approx y(a) + [y'(a)](x - a) \quad \text{Equação 86}$$

Assim, no processo de Newton Rapson, a função y é tal que, quando se substitui nela x pelo valor correto da função, ela assume o valor nulo. Tome-se como exemplo a equação a seguir:

$$x + 2 = e^x \quad \text{Equação 87}$$

A função y é definida por:

$$y(x) = x + 2 - e^x \quad \text{Equação 88}$$

Para se iniciar esse processo, é necessário assumir um valor inicial para  $x_t$ . Com esse valor, consegue-se o primeiro valor de y. A partir desses dois valores e da derivada primeira de y no ponto  $x_t$ , chega-se no próximo valor de x,

$x_{t+1}$  que fornece um valor  $y$  para a função mais próximo de zero. A relação entre os dois valores de  $x_t$  é:

$$x_{t+1} = x_t - \frac{y(x_t)}{y'(x_t)} \quad \text{Equação 89}$$

Esse processo iterativo pode ser limitado por um limite superior do valor de  $y$  em torno de zero e também pelo número de iterações.

## 15.2. *Apresentação dos modelos para otimização*

### 15.2.1. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da profundidade do canal na Zona de Transporte

Com o objetivo de conseguir, primeiramente, o ângulo de hélice ótimo ( $\phi^*$ ) em função da profundidade do canal ( $H$ ), utilizou-se como base as equações 63 e 68, expressões da taxa de produção e do consumo total de potência na zona de transporte, respectivamente. Essas duas equações foram reescritas em função de  $\phi$  e, só então, combinadas na expressão final de optimização, equação 84. A expressão resultante, além das relações necessárias para que ela fosse conseguida, estão a seguir:

$$\left( a_2 \sin(2\varphi) + a_3 \cos(2\varphi) - a_4 \frac{\cos\varphi}{\sin^2\varphi} \right) \left( \frac{1}{2} b_1 \sin(2\varphi) + b_2 \sin^2\varphi \right) = \\ (b_1 \cos(2\varphi) + b_2 \sin(2\varphi)) \left( a_1 + a_2 \sin^2\varphi + a_3 \sin\varphi \cos\varphi + \frac{a_4}{\sin\varphi} \right)$$

Equação 90

$$Z = a_1 + a_2 \sin^2\varphi + a_3 \sin\varphi \cos\varphi + \frac{a_4}{\sin\varphi} \quad \text{Equação 91}$$

$$a_1 = \frac{p\mu\pi Dv_b^2}{H}$$

$$a_2 = \frac{3p\mu\pi Dv_b^2}{H}$$

$$a_3 = \frac{p\pi Dv_b H g_a}{2}$$

$$a_4 = \frac{p\mu_{cl} w v_b^2}{\delta}$$

$$\dot{V} = b_1 \sin\varphi \cos\varphi + b_2 \sin^2\varphi \quad \text{Equação 92}$$

$$b_1 = \frac{1}{2} p \pi D v_b (H - \delta) - \frac{(\pi D)^2 + (pb)^2}{12\mu_{cl} b p} g_a \delta^3$$

$$b_2 = -\frac{p\pi D H^3 g_a}{12\mu} - \frac{\pi^2 D^2 \delta^2 \mu v_b}{2H^2 \mu_{cl} b}$$

$$W = \frac{\pi D \sin\varphi}{p} - w \quad \text{Equação 93}$$

$$w = b \cos\varphi \quad \text{Equação 94}$$

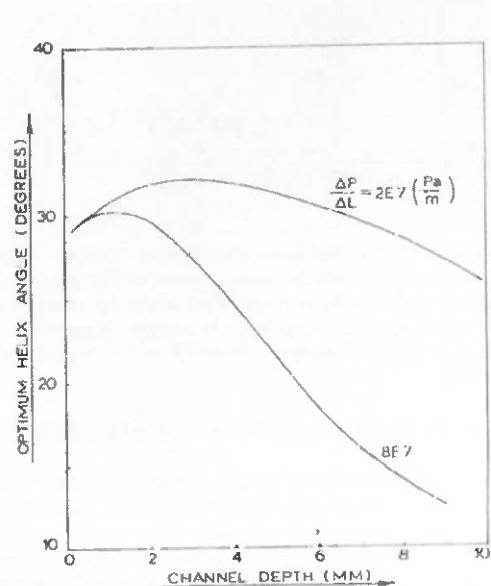
$$v_{bz} = v_b \cos\varphi \quad \text{Equação 95}$$

Agora, para se conseguir expressar o SEC em função da profundidade do canal, utilizou-se a equação 81. Nela foram introduzidas as equações de Z e V, além do par ordenado ( $H, \varphi^*$ ) resultante da simulação anterior.

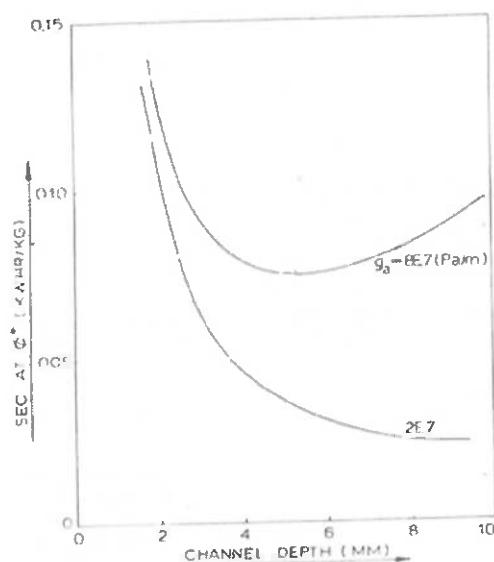
A tabela 1 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação, enquanto as figuras 20 e 21 são os resultados esperados. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: I, II e III.

**Tabela 1 Parâmetros Utilizados na construção das Figuras 20 e 21**

p	= 1
m	= 1e4
n	= 0.5
D	= 0.050
rot	= 100
L	= 1
ga2	= 2e7
ga8	= 8e7



**Figura 20 Ângulo de hélice ótimo em função da profundidade do canal (Zona de Transporte)**



**Figura 11 Valor de SEC no Ângulo de Hélice Ótimo em função da profundidade do canal (Zona de Transporte)**

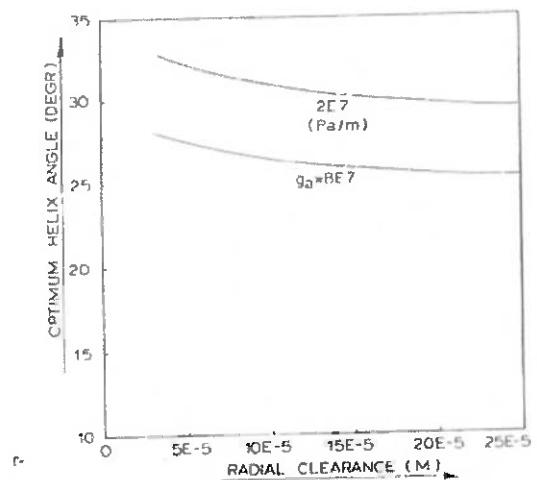
#### 15.2.2. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da folga radial do filete na Zona de Transporte

Essa determinação foi realizada de forma análoga à anterior, porém, nesse caso, o parâmetro variável é a folga radial  $\delta$  e não  $H$ .

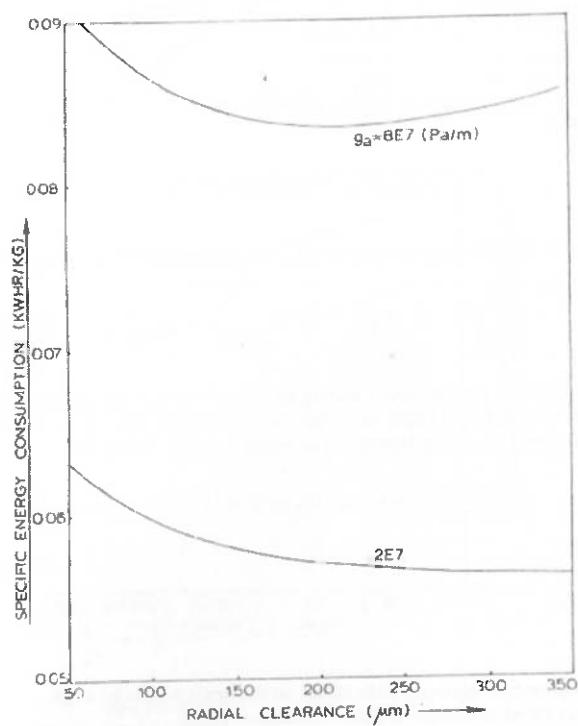
A tabela 2 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação, enquanto as figuras 22 e 23 são os resultados esperados. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: I, II e IV.

**Tabela 2 Parâmetros Utilizados na construção das Figuras 22 e 23**

$p$	= 1
$m$	= 1e4
$n$	= 0.5
$D$	= 0.050
$rot$	= 100
$L$	= 1
$ga2$	= 2e7
$ga8$	= 8e7
$H$	= 0.005



**Figura 22** Ângulo de Hélice ótimo em função da folga radial (Zona de transporte)



**Figura 23** Valor de SEC no Ângulo de Hélice Ótimo em função da folga radial (Zona de Transporte)

### 15.2.3. Determinação da proporção da potência total gasta na folga radial do filete em função da largura do filete na Zona de Transporte

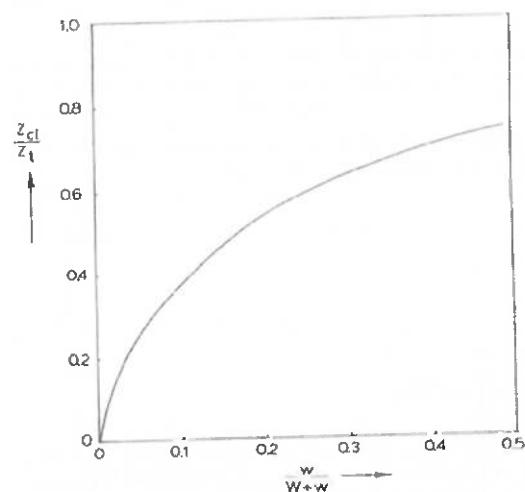
Para se determinar a proporção da potência total gasta na folga radial do filete, calculou-se, primeiramente, o gasto de potência na folga do filete (Equação 66) e em seguida o gasto no canal (Equação 63). Vale lembrar que cada um desses gastos de potência foi calculado para diferentes valores de  $\delta$ . Finalmente, a proporção é dada pela relação a seguir:

$$R = \frac{Z_{cl}}{Z_{cl} + Z_{ch}} \quad \text{Equação 96}$$

A tabela 3 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação, enquanto a figura 24 é o resultado esperado. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: V e VI.

**Tabela 3 Parâmetros Utilizados na construção da Figura 24**

p	= 1
m	= 1e4
n	= 0.5
D	= 0.0381
rot	= 100
H	= 0.001905
gz	= 27.5e6
phi	= pi * 17.7 / 180
Wt	= 5.65e-3



**Figura 24 Proporção da potência gasta na folga radial em função da largura do filete (Zona de transporte)**

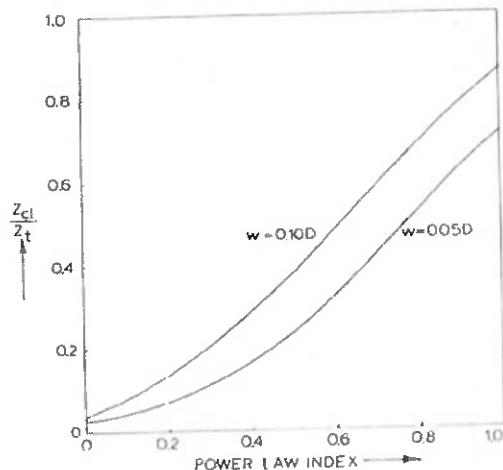
#### 15.2.4. Determinação da proporção da potência total gasta na folga radial do filete em função do power law index na Zona de Transporte

Essa determinação foi realizada de forma análoga à anterior, porém, nesse caso, o parâmetro variável é o power law index e não a folga radial  $\delta$ .

A tabela 4 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação, enquanto a figura 25 é o resultado esperado. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: V e VII.

**Tabela 4 Parâmetros Utilizados na construção da Figura 25**

p = 1
m = 1e4
D = 0.0381
delta = 0.001*D
rot = 100
H = 0.001905
gz = 27.5e6
phi = pi * 17.7 / 180
w1 = 0.05*D
w2 = 0.1*D
WW = 0.00508



**Figura 25 Proporção da potência gasta na folga radial em função do Power Law Index (Zona de transporte)**

#### 15.2.5. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da profundidade do canal na Zona de Plastificação

Com o objetivo de conseguir, primeiramente, o ângulo de hélice ótimo ( $\phi^*$ ) em função da profundidade do canal ( $H$ ), utilizou-se como base as equações 36 e 51, expressões da taxa de plastificação e do consumo total de potência na zona de plastificação, respectivamente. Essas duas equações foram reescritas em função de  $\phi$  e, só então, combinadas na expressão final de otimização, equação 85. A expressão resultante, além das relações necessárias para que ela fosse conseguida, estão apresentadas na seção que descreve a modelagem matemática dessa região.

Agora, para se conseguir expressar o SEC em função da profundidade do canal, utilizou-se a equação 81. Nela foram introduzidas as equações de  $Z$  e  $V$ , além do par ordenado ( $H, \phi^*$ ) resultante da simulação anterior.

A tabela 5 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: I, VIII e IX.

**Tabela 5 Parâmetros Utilizados nessa simulação**

p	= 1
m	= 1e4
mr	= m
n	= 0.5
D	= 0.050
rot	= 100
L	= 1
ga2	= 2e7
ga8	= 8e7
Hms	= 0.001905/2
km	= 0.25
Tb	= 50
Tm	= 0
Htm	= 4.5e5
Htr	= 0
rhom	= 0.8e3
theta	= pi * 5 / 180

#### 15.2.6. Determinação do Ângulo de Hélice Ótimo e SEC em função da folga radial do filete na Zona de Plastificação

Essa determinação foi realizada de forma análoga à anterior, porém, nesse caso, o parâmetro variável é a folga radial  $\delta$  e não  $H$ .

A tabela 6 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: I, VIII e X.

**Tabela 6 Parâmetros Utilizados nessa simulação**

p	= 1
m	= 1e4
n	= 0.5
D	= 0.050
rot	= 100
L	= 1
ga2	= 2e7
ga8	= 8e7
H	= 0.001905
Hms	= 0.001905/2
km	= 0.25
Tb	= 50
Tm	= 0
Htm	= 4.5e5

Htr = 0
rhom = 0.8e3
theta = pi * 5 / 180

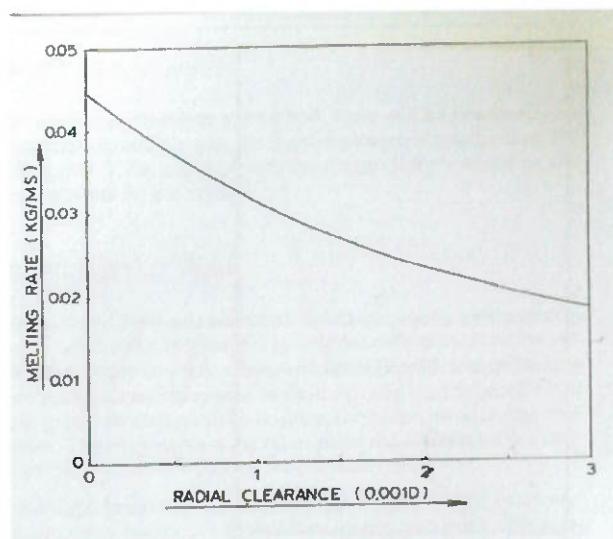
### 15.2.7. Determinação da taxa de plastificação em função da folga radial do filete na Zona de Plastificação

Para se determinar a taxa de plastificação da zona de plastificação da extrusora tomou-se como base as equações desenvolvidas anteriormente.

A tabela 5 contém os valores das grandezas envolvidas nessa simulação, enquanto a figura 26 é o resultado esperado. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: XI e XII.

**Tabela 7 Parâmetros Utilizados na construção da Figura 26**

mi = 1500
D = 0.05
rot = 100
km = 0.25
Tb = 50
Tm = 0
Htm = 4.5e5
Htr = 0
rhom = 7800
phi = pi * 17.66 / 180
Ws = D/2
theta = phi/ 3



**Figura 26 Taxa de Plastificação em função da folga radial**

#### 15.2.8. Determinação da proporção da potência total gasta na folga radial do filete em função da largura do filete na Zona de Plastificação

Para se determinar a proporção da potência total gasta na folga radial do filete, calculou-se, primeiramente, o gasto de potência na folga do filete (Equação 50) e em seguida o gasto na piscina de material plastificado (Equação 48) e no filme de material plastificado (Equação 47). Vale lembrar que cada um desses gastos de potência foi calculado para diferentes valores de  $\delta$ . Finalmente, a proporção é dada pela relação a seguir:

$$R = \frac{Z_{cl}}{Z_{cl} + Z_{mp} + Z_{mf}} \quad \text{Equação 97}$$

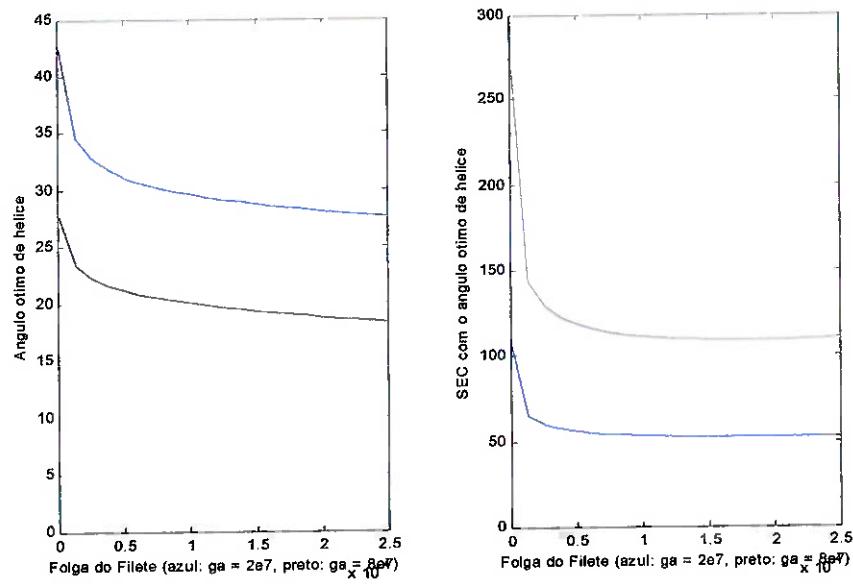
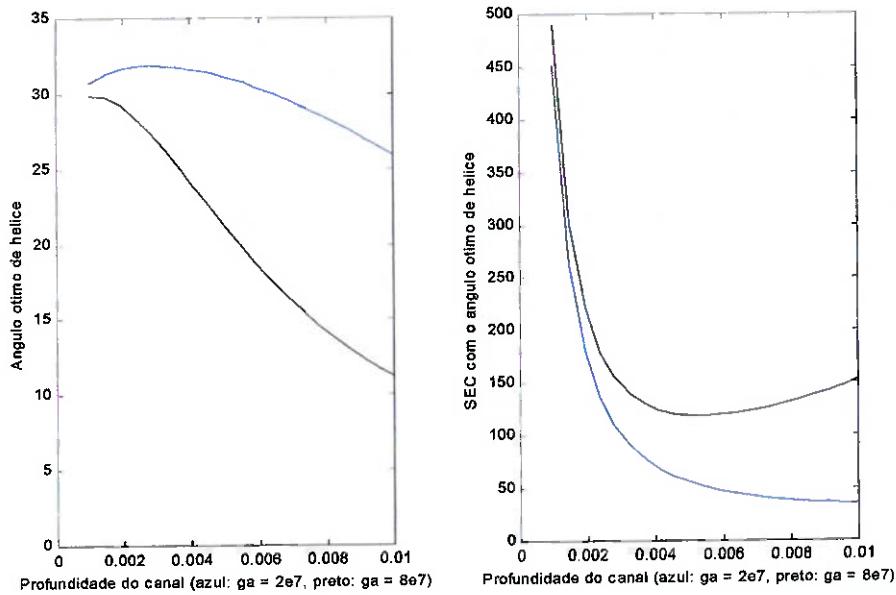
A tabela 6 contém os valores das grandezas envolvidas nessa Simulação. As funções envolvidas nesse trecho da simulação são: XIII e XIV.

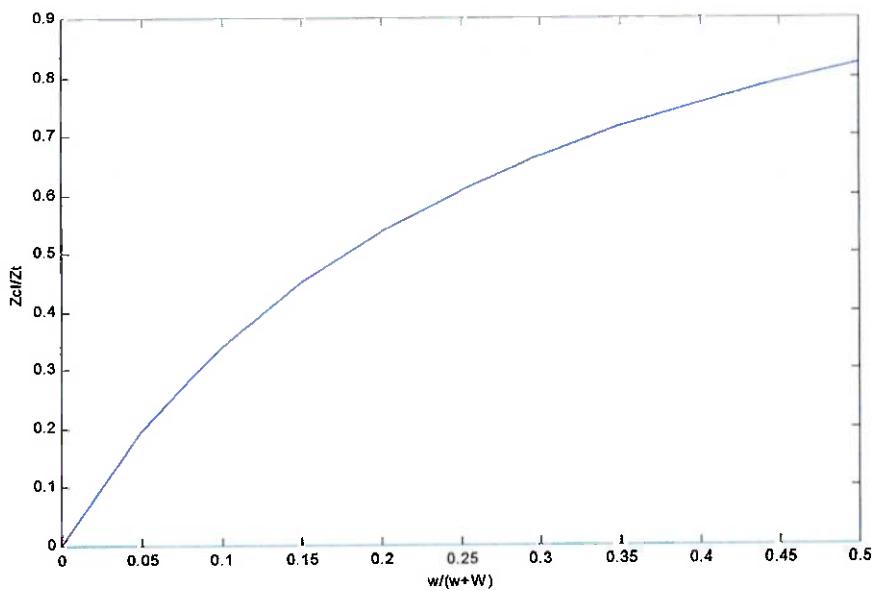
**Tabela 8 Parâmetros Utilizados nessa simulação**

p	= 1
m	= 1e4
mr	= 1e4
n	= 0.5
D	= 0.0381
delta	= 0.001*D
rot	= 100
H	= 0.001905
Hms	= 0.001905/2
km	= 0.25
Tb	= 50
Tm	= 0
Htm	= 4.5e5
Htr	= 0
rhom	= 0.8e3
gz	= 27.5e6
phi	= pi * 17.7 / 180
theta	= phi / 2
Wt	= 5.65e-3

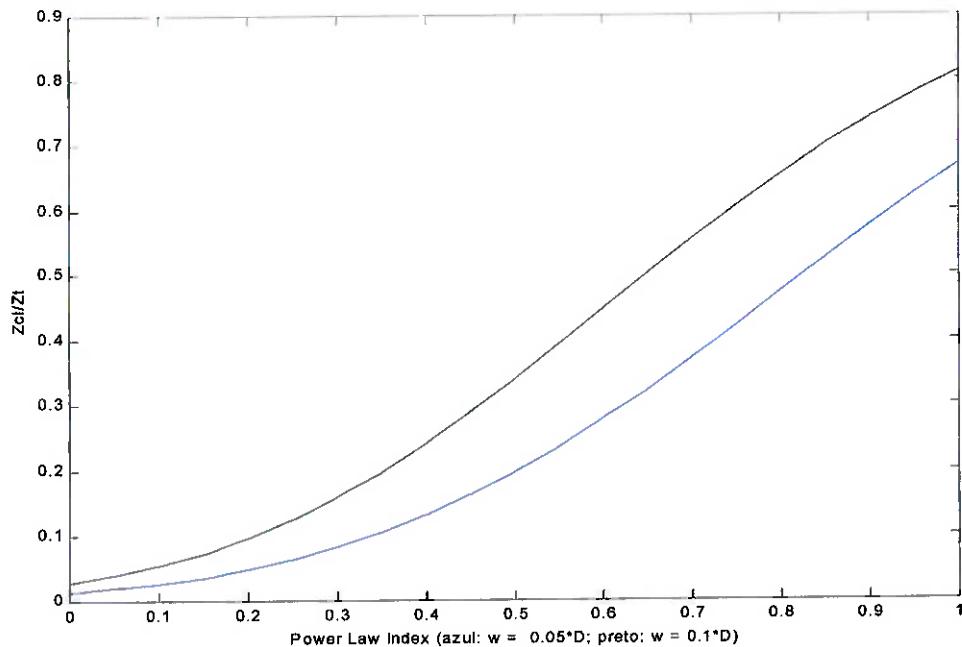
### **15.3. Resultado e Análise da Implementação**

Os gráficos a seguir foram obtidos através da implementação computacional do processo de otimização. As funções que os originam foram desenvolvidas no software *MATLAB* e estão apresentadas no Anexo.

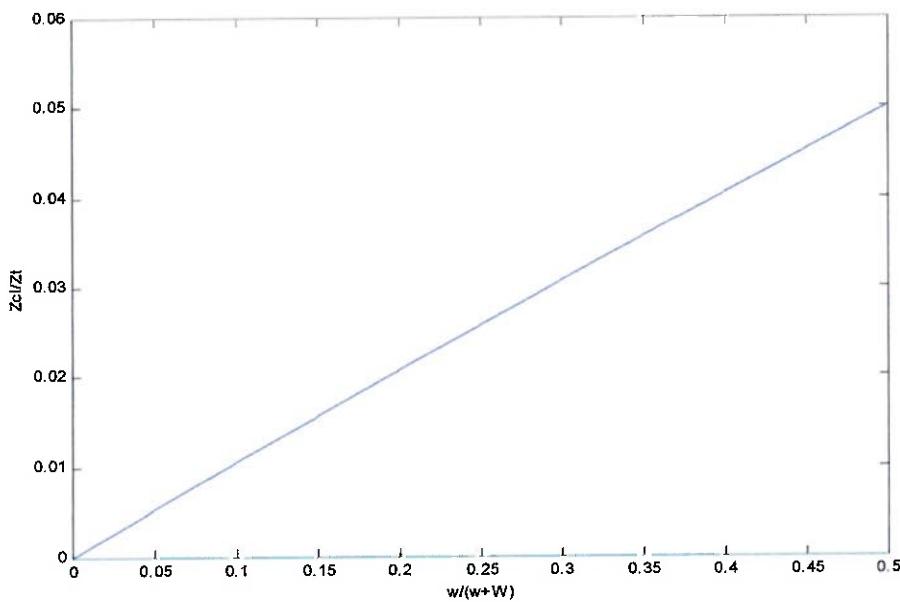




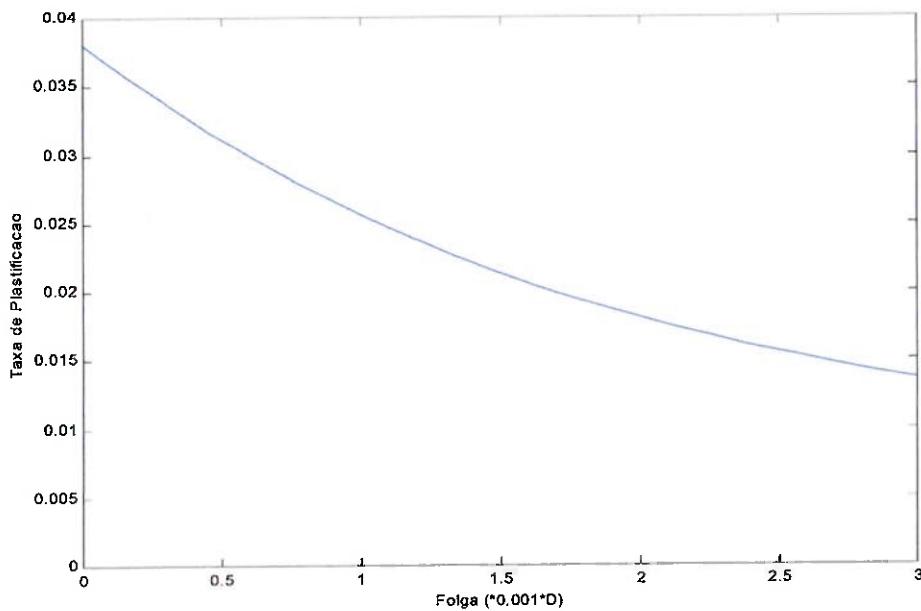
**Figura 29 Proporção da potência gasta na folga radial em função da largura do filete na Zona de transporte da rosca em análise**



**Figura 30 Proporção da potência gasta na folga radial em função do Power Law Index na Zona de transporte resultante da simulação**



**Figura 31 Proporção da potência gasta na folga radial em função da largura do filete na Zona de Plastificação resultante da simulação**



**Figura 32 Taxa de Plastificação em função da folga radial da rosca em análise**

De uma maneira geral, todos os gráficos conseguidos para a Zona de Transporte são satisfatórios. As variações nos valores das ordenadas justificam-se pelo fato de que nem todos os parâmetros para cálculo do gráfico foram explicitados pelo autor da bibliografia [1].

Faz-se necessário reforçar que, enquanto o ângulo ótimo é calculado

$$\frac{\partial \left( \frac{Z}{\dot{V}} \right)}{\partial a} = 0$$

diretamente pela expressão  $\frac{\partial \left( \frac{Z}{\dot{V}} \right)}{\partial a} = 0$  (resultados nas figuras 27a e 28a), a profundidade e a folga ótimas foram determinadas graficamente, a partir das figuras 27b e 28b respectivamente, por ser um método mais simples. Assim sendo, esses últimos fatores são ótimos quando SEC é mínimo.

Já quanto à zona de plastificação, o software só foi capaz, dentro de um tempo computacional razoável, de fornecer os valores da taxa de plastificação em função da folga radial (que assegurou a validade da expressão apresentada nas seções anteriores) e da proporção da potência na folga radial em função da espessura do filete. Não foi possível calcular o ângulo de hélice, profundidade do canal e folga radial e largura do filete ótimos devido ao alto tempo computacional gasto durante as operações de otimização.

**PARTE IV: VERIFICAÇÃO DO PROJETO DE UMA EXTRUSORA  
COMERCIAL**

## **16. ANÁLISE CRÍTICA DE UMA EXTRUSORA COMERCIAL**

Como última parte do projeto, realizou-se a análise dos parâmetros geométricos de uma extrusora de uso comercial para polietileno de alta densidade. Utilizando o procedimento de otimização desenvolvido e testado nas seções anteriores, pretende-se determinar a atual situação da geometria da rosca e as possíveis modificações que otimizariam o SEC.

As tabelas apresentadas a seguir contêm as propriedades do polietileno de alta densidade, as propriedades de processamento e a geometria da rosca. O motor de acionamento do conjunto é de 100 hp.

**Tabela 9 Propriedades do polietileno de alta densidade**

m=29,94
n=0,5
km=0,25
Tm=130
ΔH=4,5e05

**Tabela 10 Propriedades do Processamento**

ga=6e07
gz=1,38e07
Tb plast=160
Tb transp=170

**Tabela 11 Propriedades Geométricas e de Material da Rosca**

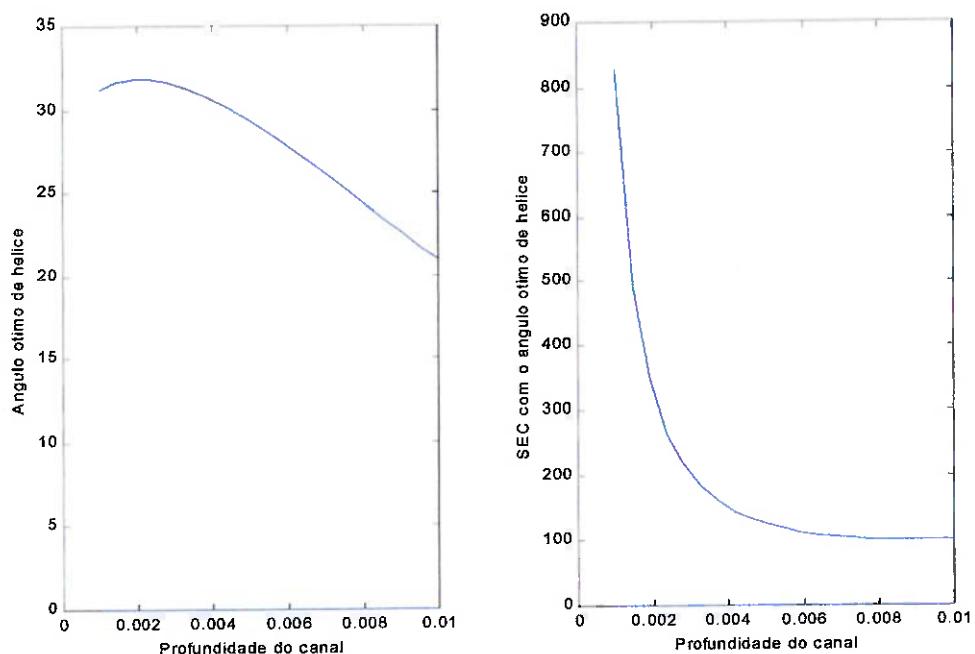
p=1
D=36
Rot=50
Lt=6*D
Lp=7*D
w=3
W=30
Phi=17,7
Teta=0,5*Phi
D transp= 26
τ <sub>a</sub> =100 Mpa

Para garantir que a rosca tenha resistência mecânica suficiente para suportar a tensão a ela imposta pelo processo de transporte de material na extrusora, é necessário determinar  $H_{\max}$  e  $H/w$ , que deve ser menor que 2,88.

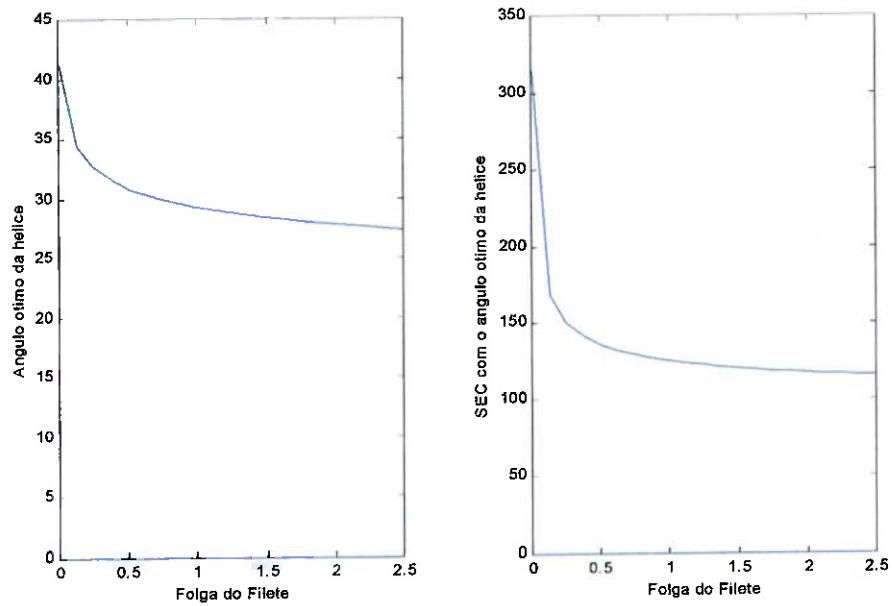
$$H_{\max} = 9,38 \text{ mm}$$

$$H/W_{\text{original}} = 1,67 \text{ (Admitindo } \frac{\tau_a}{\Delta p} = 25 \text{)}$$

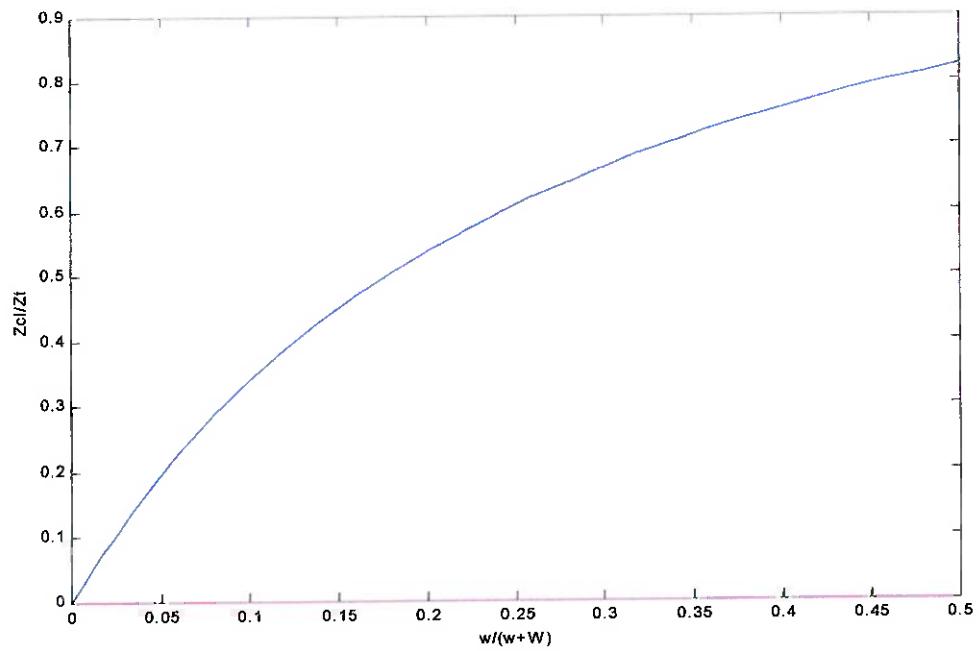
Tendo garantido a integridade mecânica da rosca, pode-se iniciar a utilização das funções de otimização, substituindo nelas os valores das tabelas dessa seção. Os gráficos mostrados a seguir são os resultados desse processo de otimização.



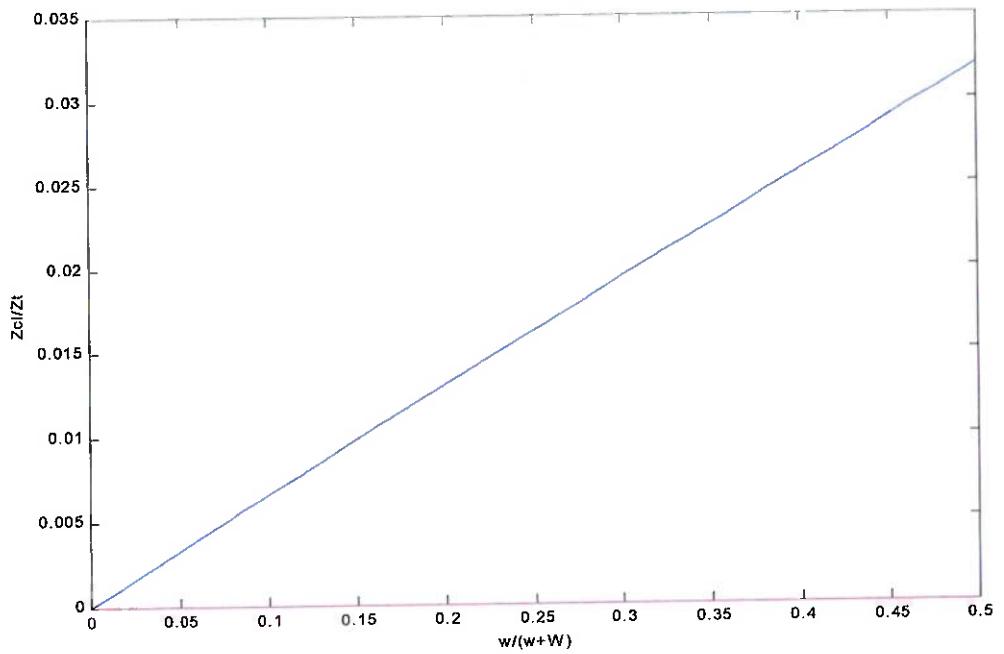
**Figura 33 Ângulo Ótimo e SEC em função da Profundidade de Corte na Zona de Transporte da rosca em análise**



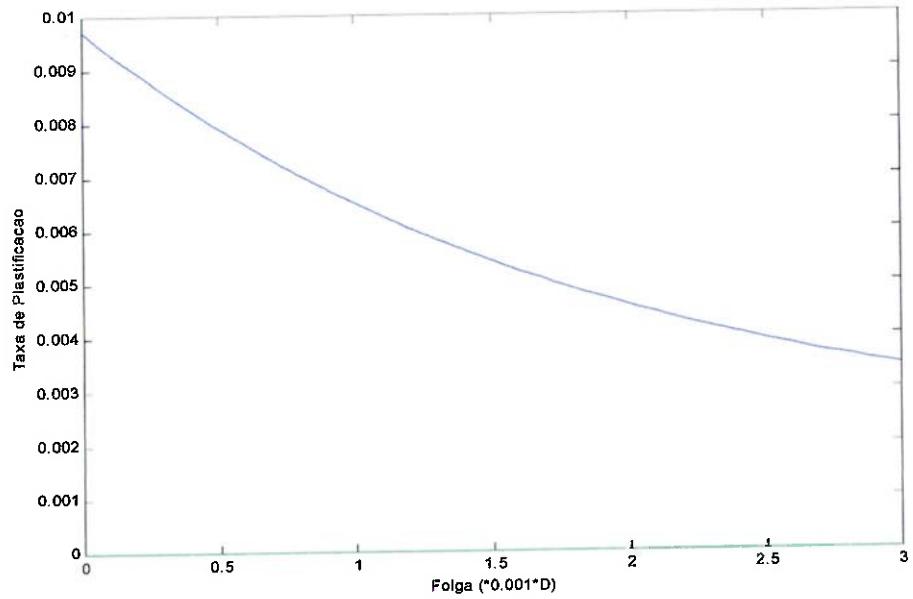
**Figura 34 Ângulo Ótimo e SEC em função da folga radial do filete na Zona de Transporte da rosca em análise**



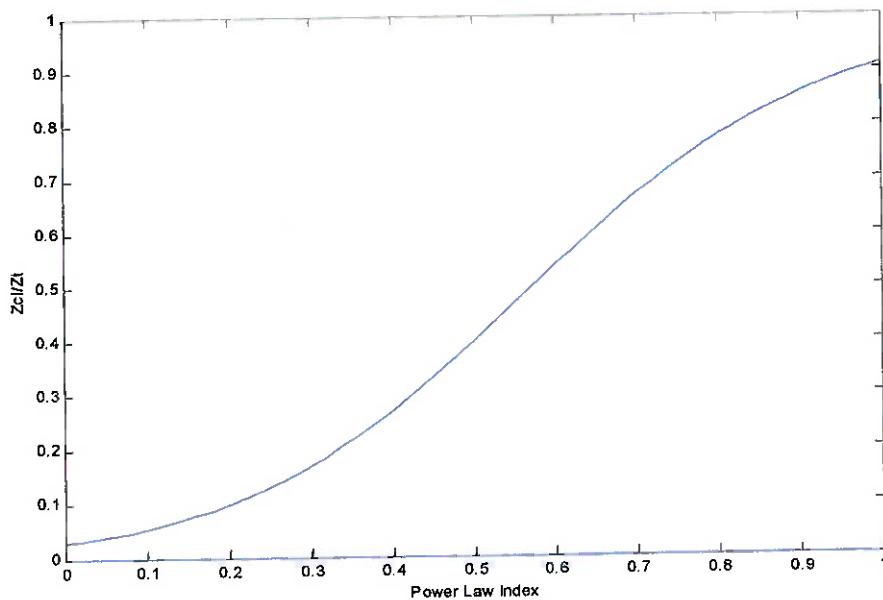
**Figura 35 Proporção da potência gasta na folga radial em função da largura do filete na Zona de transporte da rosca em análise**



**Figura 36 Proporção da potência gasta na folga radial em função da largura do filete na Zona de plastificação da rosca em análise**



**Figura 37 Taxa de Plastificação em função da folga radial da rosca em análise**



**Figura 38 Proporção da potência gasta na folga radial em função do Power Law Index na Zona de transporte da rosca em análise**

Pela figura 14, pode-se retirar o ângulo ótimo para a profundidade do canal utilizada na zona de transporte ( $\phi^* = 29,2^\circ$ ). Comparando com o ângulo de hélice atual da rosca, percebe-se que o projeto não está otimizado quanto ao SEC. Para que isso ocorra, é necessário que  $H$  seja 8mm e o  $\phi$  correspondente seja  $24,5^\circ$ .

Pela figura seguinte, pode-se, a partir do  $\phi$  determinado anteriormente, retirar a folga que minimize a relação SEC. O valor de  $\delta$  encontrado é de 1,05 maior que a folga padrão (0,001D), ou seja, 0,0378 mm.

Já a figura 16 mostra a parcela da potência total da zona de transporte que é gasta na folga radial do filete. Com a configuração original da rosca, esse gasto é de: 0.0059.E, a figura 17 mostra essa mesma proporção para a zona de plastificação, que é de: 0,0058.

Por último, as figuras 18 e 19 mostram qual a taxa de plastificação dessa rosca ( $M = 6,5 \times 10^{-3}$ ) e como o power law index do polietileno influência o gasto de potência na folga radial ( $Z_{cl}/Z_t = 0,4$ ).

## **17. CONCLUSÃO**

A primeira fase do projeto mostrou que os livros específicos sobre a moldagem por sopro são escassos. Porém, com o auxílio de artigos de revistas especializadas em plásticos, o processo pode ser totalmente entendido. Além disso, as publicações especializadas em extrusão e injeção são numerosas e auxiliam na compreensão dessas fases do procedimento de moldagem.

A segunda fase do projeto baseou-se no entendimento do processo de extrusão, bem como da modelagem física e matemática das zonas funcionais da rosca da extrusora. E, a partir desses modelos, chegou-se às equações que regem o consumo de potência desse processo. Toda a otimização da potência de acionamento foi realizada levando-se em consideração o SEC, coeficiente de consumo específico de energia, que relaciona a potência consumida e a produção da extrusora.

A fase de implantação e validação foi muito bem sucedida, apesar dos problemas com tempo computacional na simulação das funções para a zona de plastificação. Todos os gráficos construídos eram praticamente idênticos aos da bibliografia [1], diferindo um pouco devido a falta de valores numéricos para alguns parâmetros, que formam então estimados pela autora.

A fase final mostrou como o procedimento desenvolvido permite uma análise rápida e fácil da atual situação de uma rosca comercial. Para que esse procedimento possa ser usado comercialmente, seria necessária ainda a sua validação por meio de testes práticos em extrusoras devidamente instrumentadas.

## **ANEXO – Códigos de Programação**

## I - Função Newton Rapson

```
function x = newton_rapson(y, x0, tol, max)
% x = newton_rapson(y, x0, tol)
% calcula a raiz da funcao y = f(x) pelo metodo de Newton Rapson
% y    : funcao y = f(x) (com a variavel simbolica x)
% x0   : tentativa inicial da raiz
% tol  : tolerancia (x eh raiz se f(x)<tol)

dy = diff(y);
x1 = x0 ;
tent = 0 ;
f = subs(y, x1);
f = subs(f);
while and((abs(f) > tol), tent < max)
    df = subs(dy, x1) ;
    df = subs(df) ;
    x1 = x1 - ( f / df ) ;
    tent = tent + 1;
end
x = x1 ;
```

## ***II - Função de Cálculo Ângulo φ ótimo na zona de transporte***

```
function [phi, sec] = Op_Helix_Angle_M(p, m, n, D, delta, rot, L, ga,
H, phi0)
% [phi sec] = Op_Helix_Angle(p, m, n, D, rot, L, ga, H, phi0)
% Calcula o angulo otimo da helice - para a zona de transporte
% p      : numero de filetos paralelos
% m      : indice de consistencia
% n      : power law index
% D      : diametro externo da rosca
% delta  : folga entre o filete e o canhao
% rot    : rotacao do canhao (rpm)
% L      : comprimento da rosca
% ga    : gradiente de pressao
% H      : profundidade do canal
% phi0   : tentativa inicial para o angulo da helice
%
% Retornos
% phi    : angulo otimo da helice
% sec    : consumo especifico de energia

% calculando a velocidade do canhao(vb)
vb = D * rot * pi / 60;

% caculando a viscosidade no canal (mi)
mi = m*(vb/H)^(n-1);

% calculando a viscosidade na folga do filete (mi_cl)
mi_cl = m*(vb/delta)^(n-1);

% calculando a largura do filete (b) - a relacao entre b e D (bD) pode
mudar
bD = 0.1;
b = bD * D;

% x eh a variavel simbolica (no caso, representa phi)
syms x ;

% calculando a largura do foleto perpendicular (w)
w = b * cos(x);

% Calculando as variaaveis auxiliares de Z e Vp
a1 = ( p * mi * pi * D * vb^2 * L ) / H ;
a2 = ( 3 * p * mi * pi * D * vb^2 * L ) / H ;
a3 = ( p * pi * D * vb * H * ga * L ) / 2 ;
a4 = ( p * mi_cl * w * vb^2 * L ) / delta ;

b1 = (p*pi*D*vb*(H-delta))/2 -
((pi*D)^2+(p*b)^2)*(ga*delta^3)/(12*mi_cl*b*p) ;
b2 = -(p*pi*D*H^3*ga)/(12*mi) -
(pi^2*D^2*delta^3*mi*vb)/(2*H^2*mi_cl*b) ;

% Funcoes Z e Vp, em funcao de phi (representado aqui por x)
Z = a1 + a2*sin(x)^2 + a3*sin(x)*cos(x)+a4/sin(x);
```

```

Vp = b1*sin(x)*cos(x) + b2*sin(x)^2;

% Derivando Z e Vp em relacao a x (phi). Quando a variavel de derivacao
% eh x, nao precisa ser explicitada.
dZ = diff(Z);
dVp = diff(Vp);

% Calculando a funcao que gera o angulo otimo da helice
y = dZ * Vp - dVp * Z;

% Encontrando o angulo otimo de helice
phi = newton_rapson(y, phi0, 1e-3, 50) ;

% Calculando SEC para o phi otimo
sec = subs(Z, phi) / subs(Vp, phi);

```

### **III - Função de Gráfico do Ângulo $\varphi$ ótimo x H na zona de transporte**

```
function Op_Helix_Angle_Graphic_H_M(num, Hini, Hend)
% Op_Helix_Angle_Graphic(num, Hini, Hend)
% Desenha o grafico de phi X H, para a zona de transporte
% num : numero de pontos
% Hini : primeiro valor de H
% Hend : ultimo valor de H

% Valores das "constantes"
p = 1;
m = 1e4;
n = 0.5;
D = 0.050;
rot = 100;
L = 1;
ga2 = 2e7;
ga8 = 8e7;

% Tentativa inicial (20 graus)
phi0 = 20 * pi / 180;

% Montando o vetor com os valores de H
dH = (Hend - Hini) / num;
mH = [Hini : dH : Hend];

[nl nc] = size(mH);

% Montando os vetores de resposta:
% phi otimo para ga = 2e7
mPhi2 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 2e7
mSec2 = zeros(nc);
% phi otimo para ga = 8e7
mPhi8 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 8e7
mSec8 = zeros(nc);

% Barra de espera
wait = waitbar(0, ['Calculando os ' num2str(nc) ' angulos otimos da
helice']);

% Calculando os valores de phi e SEC para os valores de H
for i = 1:nc
    % Atualizando a barra de espera
    waitbar((i-1)/nc, wait);
    % Calculando phi e SEC para ga = 2e7
    [mPhi2(i), mSec2(i)] = Op_Helix_Angle_M(p, m, n, D, 0.001*D, rot,
L, ga2, mH(i), phi0) ;
    % Calculando phi e SEC para ga = 8e7
    [mPhi8(i), mSec8(i)] = Op_Helix_Angle_M(p, m, n, D, 0.001*D, rot,
L, ga8, mH(i), phi0) ;

    % Transformando os valores de phi em graus
```

```

mPhi2(i) = 180 * mPhi2(i) / pi;
mPhi8(i) = 180 * mPhi8(i) / pi;

% Corrigindo a escala dos valores de SEC (ainda nao funciona
direito)
mSec2(i) = mSec2(i) / 3.6e6;
mSec8(i) = mSec8(i) / 3.6e6;
end
% Fechando a barra de espera
close(wait);

% Criando uma janela para os graficos
figure ;

% Plotando os graficos de phi e SEC
subplot (1, 2, 1), plot(mH, mPhi2, 'b-', mH, mPhi8, 'k-'),
xlabel('Profundidade do canal (azul: ga = 2e7, preto: ga = 8e7)'),
ylabel('Angulo otimo da helice');
subplot (1, 2, 2), plot(mH, mSec2, 'b-', mH, mSec8, 'k-'),
xlabel('Profundidade do canal (azul: ga = 2e7, preto: ga = 8e7)'),
ylabel('SEC com o angulo otimo da helice');

% Calculando o valor de H que tem o SEC minimo.
[m2 i2] = min(mSec2);
[m8 i8] = min(mSec8);

Hopt2 = mH(i2(1))
Hopt8 = mH(i8(1))

```

#### **IV - Função de Gráfico do Ângulo $\phi$ ótimo x $\delta$ na zona de transporte**

```
function Op_Helix_Angle_Graphic_delta_M(num, delta_ini, delta_end)
% Op_Helix_Angle_Graphic(num, Hini, Hend)
% Desenha o grafico de phi X delta, para a area de transporte
% num : numero de pontos
% delta_ini : primeiro valor de delta
% delta_end : ultimo valor de delta

% Valores das "constantes"
p = 1;
m = 1e4;
n = 0.5;
D = 0.050;
rot = 100;
L = 1;
ga2 = 2e7;
ga8 = 8e7;
H = 0.005;

% Tentativa inicial (20 graus)
phi0 = 20 * pi / 180;

% Montando o vetor com os valores de delta
dDelta = (delta_end - delta_ini) / num;
mDelta = [delta_ini : dDelta : delta_end];

[nl nc] = size(mH);

% Montando os vetores de resposta:
% phi otimo para ga = 2e7
mPhi2 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 2e7
mSec2 = zeros(nc);
% phi otimo para ga = 8e7
mPhi8 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 8e7
mSec8 = zeros(nc);

% Barra de espera
wait = waitbar(0, ['Calculando os ' num2str(nc) ' angulos otimos da
helice']);

% Calculando o valor de phi otimo e de SEC para os varios valores de
delta
for i = 1:nc
    % Atualizando a barra de espera
    waitbar((i-1)/nc, wait);

    % Calculando phi e SEC para ga = 2e7
    [mPhi2(i), mSec2(i)] = Op_Helix_Angle(p, m, n, D, mDelta(i), rot,
L, ga2, H, phi0);
    % Calculando phi e SEC para ga = 8e7
```

```

[mPhi8(i), mSec8(i)] = Op_Helix_Angle(p, m, n, D, mDelta(i), rot,
L, ga8, H, phi0) ;

% Transformando os valores de phi para graus
mPhi2(i) = 180 * mPhi2(i) / pi;
mPhi8(i) = 180 * mPhi8(i) / pi;

% Corrigindo a escala dos valores de SEC (ainda nao funciona
direito)
mSec2(i) = mSec2(i) / 3.6e6;
mSec8(i) = mSec8(i) / 3.6e6;
end
% Fechando a barra de espera
close(wait);

% Iniciando uma janela para os graficos
figure;

% Plotando os graficos de phi e SEC
subplot (1, 2, 1), plot(mDelta, mPhi2, 'b-', mDelta, mPhi8, 'k-'),
xlabel('Folga do Filete (azul: ga = 2e7, preto: ga = 8e7)'),
ylabel('Angulo otimo da helice');
subplot (1, 2, 2), plot(mDelta, mSec2, 'b-', mDelta, mSec8, 'k-'),
xlabel('Folga do Filete (azul: ga = 2e7, preto: ga = 8e7)'),
ylabel('SEC com o angulo otimo da helice');

% Encontrando o valor de delta que tem SEC minimo (para ga = 2e7 e ga =
8e7)
[m2 i2] = min(mSec2);
[m8 i8] = min(mSec8);

Deltaopt2 = mDelta(i2(1))
Deltaopt8 = mDelta(i8(1))

```

## **V - Função de Cálculo da Potência gasta na Folga na zona de transporte**

```
function difZ = Clearance_Power_Prop_M(p, m, n, D, delta, rot, H, gz,
phi, Wt, w)
% difZ = Clearance_Power_Prop_M()
% Calcula a proporcao de potencia gasta na folga em relacao a potencia
total, durante a secao de transporte
% p      : numero de foletos paralelos
% m      : indice de consistencia
% n      : power law index
% D      : diametro externo da rosca
% delta  : folga entre o filete e o canhao
% rot    : rotacao do canhao (rpm)
% H      : profundidade do canal
% gz     : gradiente de pressao na direcao do "down channel"
% phi    : angulo de helice
% Wt    : distancia perpendicular entre o começo de dois filetes
% w      : largura perpendicular do filete

% calculando a largura perpendicular do canal
WW = Wt - w;

% calculando a velocidade do canhao (vb)
vb = D * rot * pi / 60;

% calculando a viscosidade no canal (mi)
mi = m*(vb/H)^(n-1);

% calculando a viscosidade na folga do filete (mi_cl)
mi_cl = m*(vb/delta)^(n-1);

% Calculando a razao entre o escoamento por pressao e o por atrito
rd = H^2 * gz / (6*mi*vb*cos(phi)) ;

% Calculando a potencia do canal (jah sem a coordenada z)
Zch = (1 + 3*rd + 4*tan(phi)^2)*p*mi*WW*(vb*cos(phi))^2/H ;

% Calculando a potencia da folga (jah sem a coordenada z)
Zcl = p * vb^2 * mi_cl * w / delta ;

% Calculando a proporcao da potencia
difZ = Zcl / (Zch + Zcl) ;
```

## **VI - Função de Proporção entre a Potência gasta na Folga e largura do filete na zona de transporte**

```
function Clearance_Power_Prographic_M(num)
% Clearance_Power_Prographic(num, wini, wend)
% Desenha o grafico da proporcao de potencia da folga em funcao da
largura perpendicular do filete
% na secao de transporte
% num : numero de pontos do grafico
% wini : largura perpendicular inicial do filete
% wend : largura perpendicular final do filete

% Valores das "contantes" - os valores da figura 8.27b foram usados no
grafico do livro!!!
p      = 1;
m      = 1e4;
n      = 0.5;
D      = 0.0381; % da figura 8.27 (tanto a como b)
delta = 0.001*D;
rot   = 100;
H     = 0.001905; % da figura 8.27 (tanto a como b)
gz    = 27.5e6; % da figura 7.30b
% phi  = pi * 27.5 / 180; % da figura 8.27a
phi   = pi * 17.7 / 180; % da figura 8.27b
% Wt   = 0.00254; % da figura 8.27a
Wt   = 5.65e-3; % da figura 8.27b

% Montando o vetor com os valores de w
mp = [0 : 1/num : 0.5];
mw = mp * Wt;

[nl nc] = size(mw);

% Montando o vetores de resposta
mProp = zeros(nc);

% Calculando a proporcao de potencia da folga em funcao da largura
perpendicular do filete
for i=1:nc
    mProp(i) = Clearance_Power_Prographic_M(p, m, n, D, delta, rot, H, gz,
phi, Wt, mw(i));
end

% Criando uma janela para o grafico
figure ;
% Plotando
plot(mp, mProp), xlabel('w/(w+W)'), ylabel('Zcl/Zt');
```

## VII - Função gráfico da Potência consumida na Folga x Power Law Index na zona de transporte

```
function Clearance_Prop_vs_PLI_Graphic(num)
% Clearance_Power_Prop_vs_Power_Law_Index_Graphic(num)
% Desenha o grafico da proporcao de potencia da folga em funcao do
power law index na zona de transporte
% num : numero de pontos do grafico

% Valores das "contantes"
p = 1;
m = 1e4;
D = 0.0381; % da figura 8.27 (tanto a como b)
delta = 0.001*D;
rot = 100;
H = 0.001905; % da figura 8.27 (tanto a como b)
gz = 27.5e6; % da figura 7.30b
% phi = pi * 27.5 / 180; % da figura 8.27a
phi = pi * 17.7 / 180; % da figura 8.27b
% Wt = 0.00254; % da figura 8.27a
w1 = 0.05*D;
w2 = 0.1*D;
ww = 0.00508; % da figura 8.27b

% Montando o vetor com os valores de n
mn = [0 : 1/num : 1];

[nl nc] = size(mn);

% Montando os vetores de resposta
% Respostas para o w = w1
mProp1 = zeros(nc);
% Respostas para o w = w2
mProp2 = zeros(nc);

% Calculando a proporcao de potencia da folga em funcao da largura
% perpendicular do filete
for i=1:nc
    mProp1(i) = Clearance_Power_Prop_M(p, m, mn(i), D, delta, rot, H,
    gz, phi, w2/0.1, w1);
    mProp2(i) = Clearance_Power_Prop_M(p, m, mn(i), D, delta, rot, H,
    gz, phi, w2/0.1, w2);
end

% Criando uma janela para o grafico
figure ;
% Plotando
plot(mn, mProp1, 'b-', mn, mProp2, 'k-'), xlabel('Power Law Index
(azul: w = 0.05*D; preto: w = 0.1*D)'), ylabel('Zcl/Zt');
```

## VIII - Função de Cálculo Ângulo $\phi$ ótimo na zona de plastificação

```
function [phi, sec] = Op_Helix_Angle_P(p, m, mr, n, D, delta, rot, L,
ga, H, Hms, km, Tb, Tm, Htm, Htr, rhom, theta, phi0)
% [phi sec] = Op_Helix_Angle_P(p, m, n, D, rot, L, ga, H, phi0)
% Calcula o angulo otimo da helice - para a zona de plastificacao
% p      : numero de foletos paralelos
% m      : indice de consistencia
% mr     :
% n      : power law index
% D      : diametro externo da rosca
% delta  : folga entre o filete e o canhao
% rot    : rotacao do canhao (rpm)
% L      : comprimento da rosca
% ga     : gradiente de pressao
% H      : profundidade do canal
% Hms   : profundidade maxima do filme
% km    :
% Tb    : Temperatura do canhao
% Tm    : Temperatura do filme na fronteira com o solido
% Htm   : Entalpia referente a temperatura Tm
% Htr   : Entalpia referente a temperatura Tr - temperatura que o
polimero eh introduzido no canhao
% rhom  : Densidade do fluido derretido
% theta : angulo entre a direcao tangencial ao canhao e a direcao de
delta-v
% phi0  : tentativa inicial para o angulo da helice
%
% Retornos
% phi   : angulo otimo da helice
% sec   : consumo especifico de energia

% calculando a velocidade do canhao(vb)
vb = D * rot * pi / 60;

% caculando a viscosidade no canal (mi)
mi = m*(vb/H)^(n-1);

% calculando a viscosidade na folga do filete (mi_cl)
mi_cl = m*(vb/delta)^(n-1);

% calculando a largura do filete (b) - a relacao entre b e D (bD) pode
mudar
bD = 0.1;
b = bD * D;

% x eh a variavel simbolica (no caso, representa phi)
syms x ;

% calculando a largura do filete perpendicular (w)
w = b * cos(x);

% Calculando as variaveis necessarias para Zmf
```

```

% Calculando a velocidade do solido (vsz)
vsz = vb*sin(theta)/sin(theta+x) ;

% Calculando a diferenca vetorial entre a velocidade do canhao e a
velociadade do solido (dv)
dv = sqrt(vb^2 + vsz^2 - 2*vb*abs(vsz)*cos(x)) ;

% Calculando a diferenca de temperatura entre o canhao e o solido
dTb = Tb - Tm;

% Calculando a diferenca de entalpia
dH = Htm - Htr;

% Calculando as variaveis auxiliares para o calculo de Hm(x')
B3 = (mr*Hms^2*(dv/Hms)^(n+1))/2 ;

K4 = (4*km*dTb+4*B3)/(rhom*dv*dH) ;

% Fim das variaveis de Zmf

% Calculando as variaaveis auxiliares de Z e Vp
a1 = ( p * mi * pi * D * vb^2 * L ) / H ;
a2 = ( 3 * p * mi * pi * D * vb^2 * L ) / H ;
a3 = ( p * pi * D * vb * H * ga * L ) / 2 ;
a4 = ( p * mi_cl * w * vb^2 * L ) / delta ;

b1 = (p*pi*D*vb*(H-delta))/2 -
((pi*D)^2+(p*b)^2)*(ga*delta^3)/(12*mi_cl*b*p) ;
b2 = -(p*pi*D*H^3*ga)/(12*mi) -
(pi^2*D^2*delta^3*mi*vb)/(2*H^2*mi_cl*b) ;

% Potencia da filme plastificado
Zmf = m*vb*sin(theta+x)*cos(theta)*2*dv^n*(Hms^(2-n)-delta^(2-
n))/(K4*(2-n)) ;

% Ws como na figura 8-19a - Ha uma formula para Ws, que nao se usa aqui
Ws = D/2;

% Calculando as variaveis auxiliares
a = (2*km*dTb+mi*dv^2)*rhom*vb*sin(x) ;
b = 2*dH ;
omegal = sqrt(a/b) ;

B = rhom*delta*vb*sin(x)/2;

% Funcoes Z e Mp (taxa de plastificacao), em funcao de phi
(representado aqui por x)
Z = a1 + a2*sin(x)^2 + a3*sin(x)*cos(x)+a4/sin(x)+Zmf;
Mp = sqrt(omegal^2*Ws + B^2)-B ;

% Derivando Z e Mp em relacao a x (phi). Quando a variavel de derivacao
eh x, nao precisa ser explicitada.
dZ = diff(Z);
dMp = diff(Mp);

```

```
% Calculando a funcao que gera o angulo otimo da helice  
y = dZ * Mp - dMp * Z ;  
  
% Encontrando o angulo otimo de helice  
phi = newton_rapson(y, phi0, 1e-3, 50) ;  
  
% Calculando SEC para o phi otimo  
sec = subs(Z, phi) / subs(Mp, phi);
```

## **IX - Função de Gráfico do Ângulo $\phi$ ótimo x H na zona de plastificação**

```
function Op_Helix_Angle_Graphic_H_P(num, Hini, Hend)
% Op_Helix_Angle_Graphic(num, Hini, Hend)
% Desenha o grafico de phi X H, para a zona de plastificacao
% num : numero de pontos
% Hini : primeiro valor de H
% Hend : ultimo valor de H

% Valores das "constantes"
p      = 1;
m      = 1e4;
mr     = m ;
n      = 0.5;
D      = 0.050;
rot    = 100;
L      = 1;
ga2    = 2e7;
ga8    = 8e7;
Hms   = 0.001905/2; % HIPÓTESE DA AUTORA
km    = 0.25; % da pagina 372
Tb    = 50 ;
Tm    = 0 ; % da pagina 372 - soh o delta-Tb
Htm   = 4.5e5;
Htr   = 0; % da pagina 372 - soh o delta-H
rhom  = 0.8e3 ; % da figura 8.21
theta = pi * 5 / 180 ; % HIPÓTESE DA AUTORA
% Tentativa inicial (20 graus)
phi0 = 20 * pi / 180;

% Montando o vetor com os valores de H
dH = (Hend - Hini) / num;
mH = [Hini : dH : Hend];

[nl nc] = size(mH);

% Montando os vetores de resposta:
% phi otimo para ga = 2e7
mPhi2 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 2e7
mSec2 = zeros(nc);
% phi otimo para ga = 8e7
mPhi8 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 8e7
mSec8 = zeros(nc);

% Barra de espera
wait = waitbar(0, ['Calculando os ' num2str(nc) ' angulos otimos da helice']);
```

```

% Calculando os valores de phi e SEC para os valores de H
for i = 1:nc
    % Atualizando a barra de espera
    waitbar((i-1)/nc, wait);
    % Calculando phi e SEC para ga = 2e7
    [mPhi2(i), mSec2(i)] = Op_Helix_Angle_P(p, m, mr, n, D, 0.001*D,
    rot, L, ga2, mH(i), Hms, km, Tb, Tm, Htm, Htr, rhom, theta, phi0) ;
    % Calculando phi e SEC para ga = 8e7
    [mPhi8(i), mSec8(i)] = Op_Helix_Angle_P(p, m, mr, n, D, 0.001*D,
    rot, L, ga8, mH(i), Hms, km, Tb, Tm, Htm, Htr, rhom, theta, phi0) ;

    % Transformando os valores de phi em graus
    mPhi2(i) = 180 * mPhi2(i) / pi;
    mPhi8(i) = 180 * mPhi8(i) / pi;

    % Corrigindo a escala dos valores de SEC (ainda nao funciona
    % direito)
    mSec2(i) = mSec2(i) / 3.6e6;
    mSec8(i) = mSec8(i) / 3.6e6;
end
% Fechando a barra de espera
close(wait);

% Criando uma janela para os graficos
figure ;

% Plotando os graficos de phi e SEC
subplot (1, 2, 1), plot(mH, mPhi2, 'b-', mH, mPhi8, 'k-'),
xlabel('Profundidade do canal (azul: ga = 2e7, preto: ga = 8e7)'),
ylabel('Angulo otimo da helice');
subplot (1, 2, 2), plot(mH, mSec2, 'b-', mH, mSec8, 'k-'),
xlabel('Profundidade do canal (azul: ga = 2e7, preto: ga = 8e7)'),
ylabel('SEC com o angulo otimo da helice');

% Calculando o valor de H que tem o SEC minimo.
[m2 i2] = min(mSec2);
[m8 i8] = min(mSec8);

Hopt2 = mH(i2(1))
Hopt8 = mH(i8(1))

```

## X - Função de Gráfico do Ângulo $\phi$ ótimo x $\delta$ na zona de plastificação

```
function Op_Helix_Angle_Graphic_delta_P(num, delta_ini, delta_end)
% Op_Helix_Angle_Graphic(num, Hini, Hend)
% Desenha o grafico de phi X delta, para a area de plastificacao
% num : numero de pontos
% delta_ini : primeiro valor de delta
% delta_end : ultimo valor de delta

% Valores das "constantes"
p      = 1;
m      = 1e4;
n      = 0.5;
D      = 0.050;
rot    = 100;
L      = 1;
ga2   = 2e7;
ga8   = 8e7;
H      = 0.001905;
Hms   = 0.001905/2; % HIPÓTESE DA AUTORA
km    = 0.25; % da pagina 372
Tb    = 50 ;
Tm    = 0 ; % da pagina 372 - soh o delta-Tb
Htm   = 4.5e5;
Htr   = 0; % da pagina 372 - soh o delta-H
rhom  = 0.8e3 ; % da figura 8.21
theta = pi * 5 / 180 ; % HIPÓTESE DA AUTORA

% Tentativa inicial (20 graus)
phi0 = 20 * pi / 180;

% Montando o vetor com os valores de delta
dDelta = (delta_end - delta_ini) / num;
mDelta = [delta_ini : dDelta : delta_end];

[nl nc] = size(mH);

% Montando os vetores de resposta:
% phi otimo para ga = 2e7
mPhi2 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 2e7
mSec2 = zeros(nc);
% phi otimo para ga = 8e7
mPhi8 = zeros(nc);
% SEC do phi otimo com ga = 8e7
mSec8 = zeros(nc);
```

```
% Barra de espera  
wait = waitbar(0, ['Calculando os ' num2str(nc) ' angulos otimos da  
helice']);
```

## XI - Função de Cálculo da taxa de plastificação

```
function Mp = Melting_Rate(mi, D, delta, rot, km, Tb, Tm, Htm, Htr,
rhom, phi, theta)
% Mp = Melting_Rate()
% Calcula a taxa de plastificacao
% mi      : viscosidade do fluido
% D       : diametro externo da rosca
% delta   : folga entre o filete e o canhao
% rot     : rotacao do canhao (rpm)
% km      :
% Tb      : Temperatura do canhao
% Tm      : Temperatura do filme na fronteira com o solido
% Htm     : Entalpia referente a temperatura Tm
% Htr     : Entalpia referente a temperatura Tr - temperatura que o
polimero eh introduzido no canhao
% rhom   : Densidade do fluido derretido
% phi    : angulo de helice
% theta  : angulo entre a direcao tangencial ao canhao e a direcao de
delta-v

% calculando a velocidade do canhao(vb)
vb = D * rot * pi / 60;

% Calculando a velocidade do solido (vsz)
vsz = vb*sin(theta)/sin(theta+phi) ;

% Calculando a diferenca vetorial entre a velocidade do canhao e a
velociadade do solido (dv)
dv = sqrt(vb^2 + vsz^2 - 2*vb*vsz*cos(phi));

% Calculando a diferenca de temperatura entre o canhao e o solido
dTb = Tb - Tm;

% Calculando a diferenca de entalpia
dH = Htm - Htr;

% Ws como na figura 8-19a - Ha uma formula para Ws, que nao se usa aqui
Ws = D/2;

% Calculando as variaveis auxiliares
a = (2*km*dTb+mi*dv^2)*rhom*vb*sin(phi) ;
b = 2*dH ;
omegal = sqrt(a/b) ;

B = rhom*delta*vb*sin(phi)/2;

% Calculando a taxa de plastificacao

Mp = sqrt(omegal^2*Ws + B^2)-B ;
```

## XII - Função Gráfico da Taxa de Plastificação x Folga

```
function Melting_Rate_vs_Delta(num)
% Desenha o grafico da taxa de plastificacao em funcao da folga
% num : numero de pontos do grafico

mi      = 1500; % da pagina 372
D       = 0.05;  % da pagina 372
rot     = 100;
km      = 0.25;  % da pagina 372
Tb      = 50;
Tm      = 0;    % da pagina 372 - soh o delta
Htm     = 4.5e5;
Htr     = 0;    % da pagina 372 - soh o delta
rhom   = 7800;
phi     = pi * 17.66 / 180;
theta   = phi/ 3 ; % HIPÓTESE DA AUTORA

% Montando o vetor com os valores de w
mn = [0 : 3*1/num : 3] ;
mdelta = mn * 0.001 * D;

[nl nc] = size(mn);

% Montando o vetores de resposta
mRate = zeros(nc);

% Calculando a taxa de plastificacao
for i=1:nc
    mRate(i) = Melting_Rate(mi, D, mdelta(i), rot, km, Tb, Tm, Htm,
    Htr, rhom, phi, theta) ;
end

% Criando uma janela para o grafico
figure ;
% Plotando
plot(mn, mRate), xlabel('Folga (*0.001*D)'), ylabel('Taxa de
Plastificacao');
```

### **XIII - Função de Cálculo da Potência gasta na Folga na zona de Plastificação**

```
function difZ = Clearance_Power_Prop_P(p, m, mr, n, D, delta, rot, H,
Hms, km, Tb, Tm, Htm, Htr, rhom, gz, phi, theta, Wm, w)
% difZ = Clearance_Power_Prop_P()
% Calcula a proporcao de potencia gasta na folga em relacao a potencia
total, durante a secao de plastificacao
% p      : numero de foletos paralelos
% m      : indice de consistencia
% mr     : ??????????????
% n      : power law index
% D      : diametro externo da rosca
% delta  : folga entre o filete e o canhao
% rot    : rotacao do canhao (rpm)
% H      : profundidade do canal
% Hms   : profundidade maxima do filme
% km    :
% Tb    : Temperatura do canhao
% Tm    : Temperatura do filme na fronteira com o solido
% Htm   : Entalpia referente a temperatura Tm
% Htr   : Entalpia referente a temperatura Tr - temperatura que o
polimero eh introduzido no canhao
% rhom  : Densidade do fluido derretido
% gz    : gradiente de pressao na direcao do "down channel"
% phi   : angulo de helice
% theta : angulo entre a direcao tangencial ao canhao e a direcao de
delta-v
% Wm   : largura da piscina fluido
% w    : largura perpendicular do filete

% calculando a velocidade do canhao(vb)
vb = D * rot * pi / 60;

% calculando a velocidade do canhao em relacao ao eixo z (vbz)
vbz = vb * cos(phi);

% Calculando a velocidade do solido (vsz)
vsz = vb*sin(theta)/sin(theta+phi) ;

% Calculando a diferenca vetorial entre a velocidade do canhao e a
velociadade do solido (dv)
dv = sqrt(vb^2 + vsz^2 - 2*vb*abs(vsz)*cos(phi));

% caculando a viscosidade no canal (mi)
mi = m*(vb/H)^(n-1);

% Calculando a razao entre o escoamento por pressao e o por atrito
rd = H^2 * gz / (6*mi*vb*cos(phi)) ;
```

```

% Calculando a diferenca de temperatura entre o canhao e o solido
dTb = Tb - Tm;

% Calculando a diferenca de entalpia
dH = Htm - Htr;

% Calculando as variaveis auxiliares para o calculo de Hm(x')
B3 = (mr*Hms^2*(dv/Hms)^(n+1))/2 ;

K4 = (4*km*dTb+4*B3)/(rhom*dv*dH) ;

% Potencia da folga
Zcl = (p*vb^(1+n)*m*w)/(delta^n) ;

% Potencia da parte fluida
Zmp = (1+3*rd+4*tan(phi)^2)*p*mi*Wm*vbz^2/H ;

% Potencia de parte solidia
Zmf = m*vb*sin(theta+phi)*cos(theta)*2*dv^n*(Hms^(2-n)-delta^(2-n))/(K4*(2-n)) ;

difZ = Zcl / (Zcl + Zmp + Zmf );

```

#### XIV - Função de Proporção entre a Potência gasta na Folga e largura do filete na zona de plastificação

```
function Clearance_Power_Prop_Graphic_P(num)
% Clearance_Power_Prop_Graphic_P(num, wini, wend)
% Desenha o grafico da proporcao de potencia da folga em funcao da
largura perpendicular do filete
% na secao de plastificacao
% num : numero de pontos do grafico
% wini : largura perpendicular inicial do filete
% wend : largura perpendicular final do filete

% Valores das "contantes" - os valores da figura 8.27b foram usados no
grafico do livro!!!
p      = 1;
m      = 1e4;
mr     = 1e4; % HIPÓTESE DA AUTORA
n      = 0.5;
D      = 0.0381; % da figura 8.27 (tanto a como b)
delta  = 0.001*D;
rot    = 100;
H      = 0.001905; % da figura 8.27 (tanto a como b)
Hms   = 0.001905/2; % HIPÓTESE DA AUTORA
km    = 0.25; % da pagina 372
Tb    = 50 ;
Tm    = 0 ; % da pagina 372 - soh o delta-Tb
Htm   = 4.5e5;
Htr   = 0; % da pagina 372 - soh o delta-H
rhom  = 0.8e3 ; % da figura 8.21
gz    = 27.5e6; % da figura 7.30b
% phi  = pi * 27.5 / 180; % da figura 8.27a
phi   = pi * 17.7 / 180; % da figura 8.27b
theta = phi / 2 ; % HIPÓTESE DA AUTORA
% Wt   = 0.00254; % da figura 8.27a
Wt    = 5.65e-3; % da figura 8.27b
Wm    = Wt/2; % HIPÓTESE DA AUTORA

% Montando o vetor com os valores de w
mp = [0 : 1/num : 0.5];
mw = mp * Wt;

[nl nc] = size(mw);

% Montando o vetores de resposta
mProp = zeros(nc);

% Calculando a proporcao de potencia da folga em funcao da largura
perpendicular do filete
for i=1:nc
    mProp(i) = Clearance_Power_Prop_P(p, m, mr, n, D, delta, rot, H,
Hms, km, Tb, Tm, Htm, Htr, rhom, gz, phi, theta, Wm, mw(i));

```

```
end

% Criando uma janela para o grafico
figure ;
% Plotando
plot(mp, mProp), xlabel('w/(w+W)'), ylabel('Zcl/Zt');
```

## **18.BIBLIOGRAFIA**

1. **Rauwendaal, C.** “Polymer Extrusion”, Hanser Publisher, Munich – 3<sup>a</sup> Edição 1994.
2. **Fenner, R. T.** “Extruder Screw Design”, Butterworth Group, Londres – 1970.
3. **Jones, D. A., Mullen, T. W.** “Blow Molding”, Reinhold Publishing Corporation, Nova Iorque – 1961.
4. **Whelan, T.** “Manual de Moldagem por Sopro da Bekum”, Hamburg Gráfica e Editora, São Paulo – 1999.
5. **Gaspar-Cunha, A., Covas, J. A.** “The Design of Extrusion Screws: An Optimization Approach”, International Polymer Processing, Volume XIV Issue 3, Hanser Publishers , Munique – 2001.
6. **Shon, K., Chang, D., White, J. L.** “Dynamic Performance of Single-Screws of Different Configurations”, International Polymer Processing, Volume XIV Issue 1, Hanser Publishers , Munique – 1999.
7. **Wang, S., Makinouchi, A., Okamoto, M.** “Viscoplastic Material Modeling for the Stretch Blow Molding Simulation”, International Polymer Processing, Volume XV Issue 2, Hanser Publishers , Munique – 2000.