

Conceitos Sobre Projetos de Roscas Para Extrusão*

Chris Rauwendaal

Resumo: A maneira correta de abordar projetos de roscas esta na combinação da teoria de extrusão com a experiência prática. Enquanto a teoria de extrusão não estiver completamente desenvolvida, não existirá substituto para a experiência prática. Neste trabalho uma abordagem prática do projeto de rosca é desenvolvida com o uso mínimo da teoria de extrusão para facilitar uma implementação mais ampla desta abordagem. O projeto das zonas de transporte de sólidos, de plastificação, de transporte do fundido, e de mistura da extrusora será descrito baseado numa discussão do que acontece fisicamente com o material à medida que este passa pela rosca.

Palavras-Chave: Extrusão de polímeros, projeto de rosca.

INTRODUÇÃO

O projeto de roscas para extrusoras de rosca única ainda é considerado como sendo mais uma arte do que uma ciência. Entretanto, como chegamos a última década do século vinte com os conceitos de engenharia já devidamente estabelecidos na área de extrusão de rosca-única, conseqüentemente, os projetos de rosca desenvolvidos atualmente podem e devem ser baseados nos princípios sólidos de engenharia. Avanços consideráveis foram atingidos em vários aspectos sobre projetos de roscas como resultado da análise teórica da interação do projeto de rosca com o desempenho da extrusora. Ignorar estes avanços impedirá o progresso da tecnologia de extrusão e resultará em processos de extrusão ineficientes e, portanto, menos produtivos.

CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS

Resistência à Torção

Um requisito importante para a rosca da extrusora é a capacidade de transmitir o torque necessário para girar a rosca. A área mais crítica da rosca, nesse caso, é a seção de alimentação. A resistência máxima resultante do torque T é:

$$\tau_{\max} = \frac{2TR_s}{\pi(R_s^4 - R_c^4)} \quad (1)$$

O significado das variáveis nas equações é dado na lista de nomenclatura.

A resistência máxima deve ser menor que a resistência admissível da rosca metálica. Assim, a seguinte desigualdade vale para a raiz de uma rosca sólida:

$$R_s > \left[\frac{2}{\pi\tau_a} \right]^{1/3} \quad (2)$$

A relação entre o torque T e a potência Z fornecida à rosca é dada por:

$$Z = 2\tau TN \quad (3)$$

onde N é a velocidade rotacional da rosca.

Das equações (2) e (3), o diâmetro máximo da raiz pode ser determinado em função da potência e da velocidade da rosca. Isto pode ser visto na Figura 1. Com a redução da velocidade da rosca a uma potência constante, o diâmetro máximo da raiz da rosca tem que aumentar. A Figura 1 é baseada numa resistência ao cisalhamento admissível de 100 MPa.

* Texto original em inglês publicado nos anais do 1º Congresso Brasileiro do Polímeros, São Paulo, Nov (1991)

Chris Rauwendaal – Rauwendaal Extrusion Engineering Inc., Los Altos Hills, CA 94022 — USA

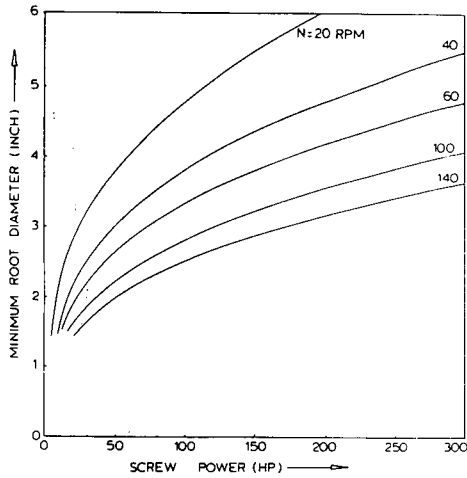


Fig. 1. Diâmetro mínimo da raiz da rosca na seção de alimentação em função da potência e da velocidade da rosca.

Desgaste da Rosca

Desgaste da rosca, infelizmente, ocorre em qualquer extrusora em operação. A única diferença entre uma extrusora e outra é a taxa de desgaste. Muitas roscas, duram vários anos em operação contínua. Entretanto, na prática, roscas de extrusão frequentemente só duram alguns meses. Como resultado, a fabricação e a reconstrução de roscas tornou-se um negócio de relativa importância.

Um perfil típico de desgaste ao longo do comprimento da rosca é mostrado na Figura 2. O desgaste geralmente é concentrado na seção de compressão da rosca e ocorre principalmente na extremidade do filete. Embora quase toda operação de extrusão sofra deste tipo de desgaste, poucos estudos têm sido efetuados nesta área. Infelizmente, parece que em muitos casos, a quantidade de pesquisa desenvolvida na área de processamento de polímeros é inversamente proporcional à importância do problema. Uma inspeção mais detalhada da rosca desgastada, frequentemente mostra sinais de contato metal com metal entre a rosca e o barril, o que indica uma falha (ruptura) da camada lubrificante do polímero fundido. O trabalho de Fenner [1] fornece evidências indiretas deste fenômeno; experimentos sobre "fluxo de escape" na folga da rosca, desenvolvidos por Rauwendaal [2] fornecem evidências mais diretas.

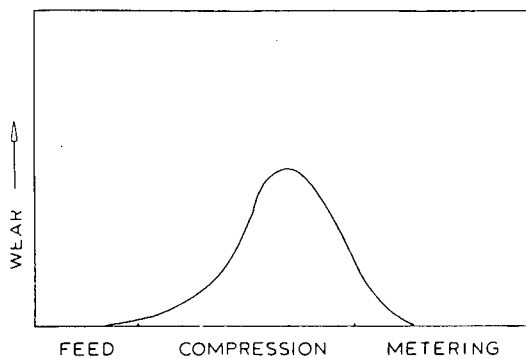


Fig. 2. Perfil típico de desgaste numa extrusora de rosca-única convencional

Parece que a falha na camada lubrificante é determinada pelas propriedades viscoelásticas do fundido, sendo que quanto mais elástico for o material mais suscetível estará à ruptura do filme fundido. Materiais com características de fluxo relativamente Newtoniano, tais como nailon e policarbonato, são pouco suscetíveis à falhas do filme fundido, e resultam em pouco desgaste da rosca. Uma geometria de rosca para reduzir a tendência de ruptura do filme fundido foi proposta por vários autores [2,4-6], e é mostrada na Figura 3. Este desenho é baseado no efeito de "rolamento hidrodinâmico".

O contato metal-metal na rosca é devido à deflexão lateral da rosca. Uma das causas mais prováveis desta deflexão é a formação de cunha do leito de sólidos, à medida que o mesmo é forçado para dentro de um canal de profundidade continuamente decrescente. Esta ação de formar cunha pode ser diminuída por:

- 1) uma redução na razão de profundidade do canal (taxa de compressibilidade da rosca);
- 2) um aumento do comprimento axial da seção de compressão;
- 3) um preaquecimento da alimentação.

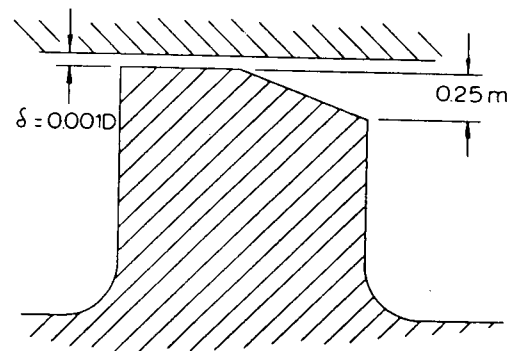


Fig. 3. Geometria do filete para reduzir a mudança no contato entre a rosca e o barril

OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE DE SÓLIDOS

O transporte de sólidos em extrusoras de rosca-única ocorre devido ao arraste por fricção, sendo que a força motriz no processo de transporte é a força friccional no barril, enquanto que a força friccional na superfície da rosca é uma força retardadora no processo de transporte. A taxa de transporte de sólidos é determinada pela densidade do leito de sólidos (ρ_b), a profundidade H do canal, o número de filetes p , a largura do canal W , e a componente de velocidade do leito de sólidos v_{SZ} ao longo do canal:

$$M_s = \rho_b p W v_{SZ} \quad (4)$$

A velocidade do leito de sólidos é determinada pelo ângulo de transporte do leito de sólidos θ , como pode ser vis-

to na Figura 4. Este ângulo é determinado à partir de um balanço de forças num elemento do leito de sólidos. O transporte de sólidos pode ser expresso como [7]:

$$\theta = \arcsen \frac{(1 + f_s - \kappa^2)^{1/2} - f_s \kappa}{1 + f_s^2} \cdot \phi \quad (5)$$

onde:

$$k = \frac{H}{f_b^2} \ln \frac{P(Z)}{P_0} + \frac{f_s}{f_b} \left[1 + \frac{2H}{W} \right] \quad (5a)$$

À partir destas equações, o efeito da geometria da rosca pode ser facilmente avaliado. Por exemplo, a Figura 5 mostra a influência da profundidade do canal na taxa de transporte de sólidos. Para cada combinação de COF com o aumento de pressão, existe uma profundidade de canal ótima, na qual a taxa máxima de transporte de sólidos pode ser obtida. A profundidade ótima do canal diminui com aumento da pressão na zona de transporte de sólidos. À partir da Figura 5, fica claro também que o transporte de sólidos diminui quando a geometria da rosca muda de uma rosca de filete único para uma geometria de filete duplo.

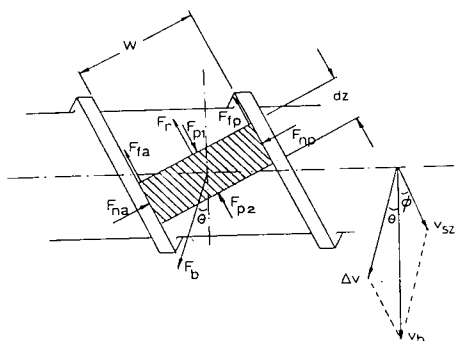


Fig. 4. Diagrama de velocidade no transporte de sólidos.

Pode-se determinar também, o ângulo ótimo da hélice de rosca, como mostrado na Figura 6. Quando f_b fica próximo de f_s , o ângulo ótimo de hélice é de, aproximadamente, 15 a 20 graus. Quando f_b é muito maior que f_s , como por exemplo numa extrusora de barril chanfrado, o ângulo ótimo é de, aproximadamente, 25 a 30 graus. A taxa de transporte de sólidos pode ser otimizada utilizando-se:

- a profundidade do canal e o ângulo da hélice ótimos;
- um barril com superfície de alta fricção (ranhuras);
- uma rosca com superfície de baixa fricção (revestimento de níquel, impregnado com teflon);
- um raio grande do flanco do filete para reduzir a deformação interna do leito de sólidos;
- uma rosca com filete único, sendo que filetes múltiplos devem ser evitados;

– manter a temperatura do barril na qual f_b atinge o seu máximo.

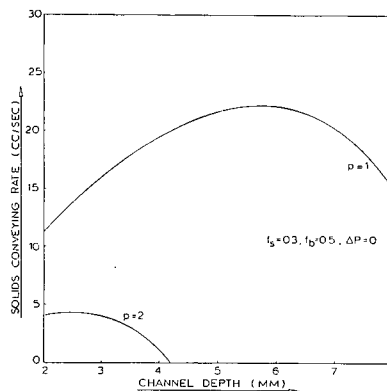


Fig. 5. Taxa de transporte de sólidos em função da profundidade do canal.

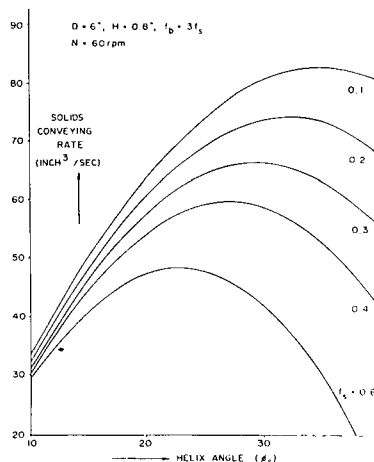


Fig. 6. Taxa de transporte de sólidos em função do ângulo da hélice.

OTIMIZAÇÃO NA PLASTIFICAÇÃO

O mecanismo de fusão em extrusoras de rosca-única é descrito pelo termo "transferência do fundido induzido por arraste". Um modelo de fusão é mostrado na Figura 7. Para um fluido Newtoniano e independente da temperatura, a taxa de fusão por unidade de comprimento ao longo do canal, pode ser escrito como [7]:

$$\frac{dM_p}{dz} = [\Omega W_s + (0.5 \rho_m \delta v_b \sin \phi)^2]^{1/2} - 0.5 \rho_m \delta v_b \sin \phi \quad (6)$$

onde:

$$\Omega = (K_m \Delta T_b + 0.5 \mu \Delta v^2) \rho_m v_b \sin \phi / \Delta H$$

Pela equação 6 fica claro que aumentando a folga nos filetes da rosca (distância entre topo do filete e o barril) a taxa de fusão diminui.

A influência do ângulo da hélice e dos filetes múltiplos no comprimento de fusão, é demonstrada na Figura 8. A

eficiência da fusão aumenta com o ângulo da hélice, sendo que a máxima ocorre à ângulos de aproximadamente 30 graus. Acima desse ângulo, obtém-se somente aumentos irrelevantes. Filetes múltiplos podem resultar num aumento da taxa de fusão, desde que se empregue ângulos da hélice maiores que 15 graus.

A capacidade de fusão pode ser melhorada usando-se:

- filetes múltiplos;
- uma pequena folga nos filetes da rosca;
- um ângulo da hélice grande;
- uma largura de filete estreita;
- aquecimento interno da rosca.

Frequentemente, afirma-se que roscas com "filetes de barreira" possuem um desempenho na fusão superior àquelas que não os têm. Entretanto, baseado numa análise de engenharia de várias roscas tipo barreira [8], vide figura 9, parece não haver fundamento para tal afirmação. A única rosca tipo barreira, que mostra uma melhora na fusão é a rosca de filete de barreira tríplice, desenvolvida por Igen Housz [9]. A melhora na eficiência de fusão desta rosca, entretanto, é devido ao fato de que ela é uma rosca de filetes múltiplos, e não devido a presença dos filetes de barreira.

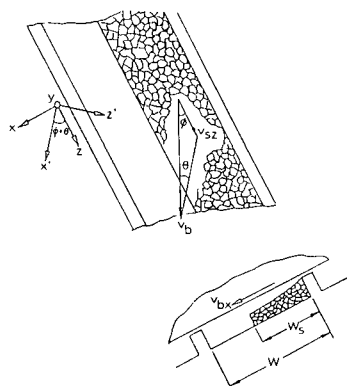


Fig 7. Modelo de fusão numa extrusora de rosca-única.

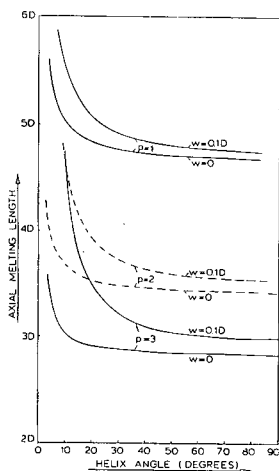


Fig.8. Influência do ângulo da hélice e do número de filetes no comprimento de fusão.

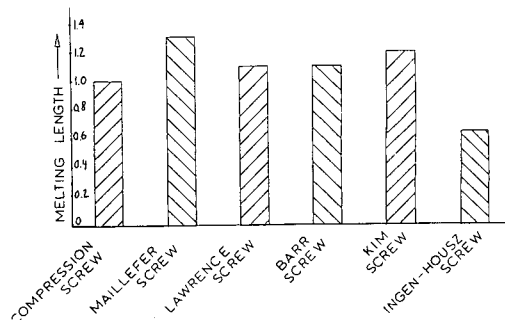


Fig.9. Comparação no desempenho de fusão de várias roscas de "barreira".

OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE DO FUNDIDO

A vazão de um fluido Newtoniano na seção de homogeneização (dosagem) de uma extrusora de rosca-única pode ser expressa como:

$$V = 0.5 pWHv_{bz} - \frac{WH^3\Delta P}{12\mu\Delta z} \quad (7)$$

Assumindo-se que o "fluxo de escape" (fluxo de vazamento acima das filetes) é desprezível. Para um fluido da lei das potências, pode-se usar uma expressão aproximada:

$$V = \frac{4+n}{10} pWHv_{bz} - \frac{WH^{2+n}\Delta P}{4m(1+2n)v_{bz}^{n-1}\Delta z} \quad (7a)$$

Para gradientes de pressão positivos, a profundidade do canal ótima pode ser encontrada utilizando-se:

$$\frac{\partial V}{\partial H} = 0 \quad (8)$$

Similarmente, o ângulo da hélice ótimo é encontrado através de:

$$\frac{\partial V}{\partial \phi} = 0 \quad (9)$$

Quando, tanto a profundidade do canal como o ângulo da hélice são otimizados, as equações 8 e 9 devem ser resolvidas simultaneamente. Isto resulta nas seguintes expressões, para o ângulo da hélice e a profundidade de canal ótimos, respectivamente:

$$\phi^* = 30 \quad [\text{graus}] \quad (10)$$

$$H^* = 1.86 \left[\frac{\mu v_b}{g_a} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Um procedimento similar pode ser usado para fluidos não-Newtonianos, embora seja consideravelmente mais difícil obter soluções analíticas precisas. Foram obtidas soluções aproximadas [10]:

$$\phi^* = 13.5 + 16.5n \quad \text{[graus]} \quad (12)$$

$$H^* = \left[\frac{(4+n)(1+2n)2mv_{bz}^n}{15g_a \sin \phi} \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (13)$$

onde, n é o índice da lei das potências do polímero fundido. Estas equações permitem uma otimização direta da geometria da rosca na seção de homogeneização. O transporte do fundido pode ser melhorado usando-se:

- valores ótimos para o ângulo da hélice e da profundidade do canal;
- roscas com filete único e folga pequena nos filetes e evitando-se filetes múltiplos;
- aquecimento interno da rosca.

A última medida, pode ser determinada, à partir de análise não-isotérmica do processo de fluxo de arraste [11]. O benefício adicional da rosca é que a carga no motor será reduzida e que a descarga será menos dependente das flutuações da temperatura do barril.

OTIMIZANDO O DESEMPENHO NA MISTURA

Roscas de extrusão sem seção de mistura possuem baixa capacidade de mistura, e portanto, geralmente recomenda-se o uso de dispositivos de mistura quando se deseja boa qualidade do fundido com condições estáveis de extrusão. Elementos para mistura distributiva são úteis em todas as operações de extrusão, enquanto elementos para mistura dispersiva são necessários somente quando os aglomerados no composto precisam ser quebrados em partículas menores. Existe uma variedade enorme de dispositivos de mistura usados na indústria de extrusão com pouco consenso sobre as principais distinções entre uma boa seção de mistura e uma seção de mistura ruim. Este assunto é tratado mais detalhadamente numa publicação recente [12].

Algumas das características gerais desejados na seção de mistura são:

1. A seção de mistura deve ter a capacidade de bombeamento para a frente (isto é, mínima queda de pressão);
2. fluxo laminar através da seção de mistura, evitando-se pontos mortos;
3. A seção de mistura deve limpar completamente a superfície do barril. Portanto, ranhuras tangenciais devem ser evitadas;
4. A seção de mistura deve ser fácil de se limpar; tempos longos de limpeza durante a troca de material, resulta num aumento do tempo parado;
5. Facilidade na construção e baixo custo.

As seções de mistura são geralmente separadas em elementos de mistura distributiva e dispersivas, dependendo se o objetivo da ação da mistura é a uniformidade espacial ou o tamanho reduzido dos aglomerados.

Seções de mistura distributivas

O processo de mistura distributiva é razoavelmente compreendido como resultado do trabalho de Spencer and Wiley [13], Mohr et al [14], Erwin [15], Ottino [16], e outros.

Dois características desejáveis para seções de mistura distributivas são

- a: O fluido deve ser submetido a uma deformação cisalhante significativa;
- b: O fluxo deve ser dividido frequentemente com reorientação dos elementos de fluido.

Baseado nas características e as regras gerais acima mencionados, as seções de mistura podem agora ser avaliadas prontamente. Por exemplo, a seção de mistura com pinos apresentada na Figura 10 não respeita a segunda regra e por essa razão não é uma seção de mistura conveniente. A seção de mistura "Dulmage", vide Figura 11, possui uma boa capacidade de mistura distributiva, entretanto, ela desrespeita a terceira regra. Isto pode causar problemas, porque a ação de fricção da rosca é crítica para a transferência de calor e para o transporte. A seção de mistura "Saxton", na Figura 12, possui capacidade de mistura distributiva igual a da seção de mistura "Dulmage" e sem as desvantagens desta. A seção de mistura "Saxton" baseia-se num bom entendimento dos requisitos para mistura distributiva [14] e, em geral, melhorará o desempenho da rosca de extrusão. A "CMT" apresentada na Figura 13 possui boa capacidade de mistura distributiva, entretanto, transgredir as regras 1 a 4. Portanto, pode-se esperar que durante a operação podem ocorrer problemas devido a pontos mortos, degradação e tempos longos de troca de material. Uma comparação de vários dispositivos para mistura distributiva comercializados é mostrada na Tabela 1.

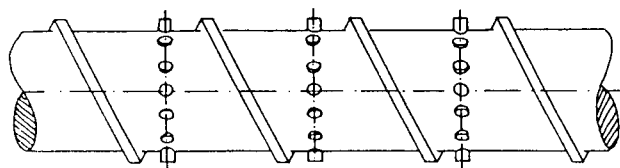


Fig.10. Seção de mistura com pinos.

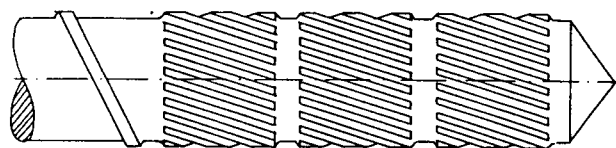


Fig.11. Seção de mistura tipo "Dulmage".

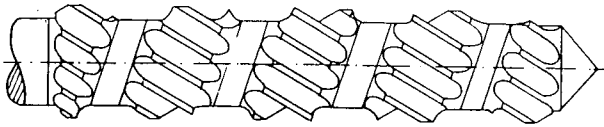


Fig. 12. Seção de mistura tipo "Saxton".

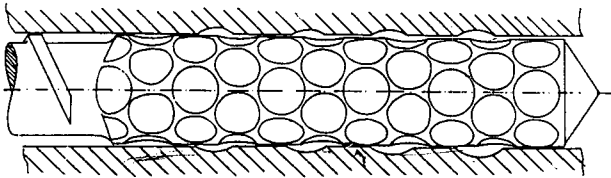


Fig. 13. Seção de mistura tipo "CTM".

TABELA I - COMPARAÇÃO DE VÁRIOS DISPOSITIVOS PARA MISTURA DISTRIBUTIVA

Seção de Mistura distributiva	A	B	C	D	E	F	G
Pins (22)*	-	-	o	+	++	-	+
Dulmage (27)	+	+	-	+	+	+	++
Saxton (30)	+	+	++	+	+	+	++
CTM (17)	--	o	-	-	--	+	++
Blockhead (17)	--	--	--	+	+	-	+
Pineapple (25)	-	+	o	+	+	+	++
Axon (28)	+	+	+	+	++	+	o
Stat-Dyn (26)	-	+	+	+	o	+	++
Double wave (24)	+	+	+	+	-	+	-
Pulsar (24)	+	+	+	+	o	o	-
Strat-blend (23)	+	o	+	+	o	o	-
Dray (21)	-	o	+	+	o	o	-

++ = bom; + razoável; 0 = neutro; - = fraco; -- = muito fraco.

- A. Queda de pressão
- B. Fluxo Laminar hidrodinâmico
- C. Limpeza do barril
- D. Facilidade de operação
- E. Custo de fabricação
- F. Deformação sob cisalhamento
- G. Corte de Fluxo com reorientação

Seções de mistura dispersiva

Dispositivos para mistura dispersiva devem submeter todos os elementos do fluido a um nível de tensão de cisalhamento elevado e uniforme e de curta duração para conseguir a quebra de aglomerados na matriz polimérica. Para que uma seção de mistura seja um dispositivo eficaz de mistura dispersiva, ela deve ter as seguintes características:

a: A seção de mistura deve possuir uma região de alta tensão onde o material é submetido a tensões elevadas;

b: A região de alta tensão deve ser projetada de tal forma que a exposição às altas tensões seja de curta duração;

c: Todos os elementos do fluido devem sofrer o mesmo nível de alta tensão para se conseguir uma mistura uniforme.

Um dispositivo de mistura dispersiva comumente utilizado é o "anel de bolha" ("blister ring", vide Figura 14). Entretanto, visto que a tensão de cisalhamento na folga depende da distância normal [7], a ação cisalhante não será uniforme. Além disso, o anel transgreda a regra número 1 sendo, portanto, a seção de mistura menos conveniente.

Um dispositivo para mistura comumente utilizado é a seção de mistura da Union Carbide (UC) desenvolvida por LeRoy [17], vide Figura 15. Esta seção de mistura canelada possui um ângulo helicoidal de 90 graus e, portanto, não tem capacidade de bombeamento para a frente. A seção de mistura da "UC", assim despreza as regras 1 e 2. Estas preocupações, entretanto, aparentemente não são compartilhadas por muitas pessoas na indústria de plásticos, já que a seção de mistura provavelmente mais utilizada nesta indústria é a da "UC". Sem dúvida, a aceitação de um determinado dispositivo para extrusão na indústria nem sempre está diretamente relacionada às suas características funcionais de desempenho.

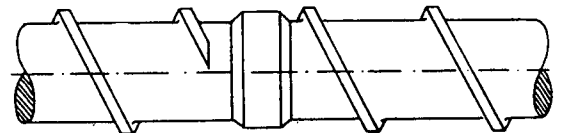


Fig. 14. Seção de mistura tipo "anel de bolha".

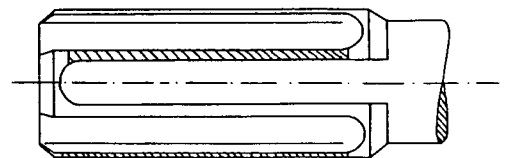


Fig. 15. Seção de mistura da Union Carbide.

Uma seção de mistura canelada similar, é a seção de mistura Egan desenvolvida por Gregory e Street [18]. Essa seção de mistura possui caneluras helicoidais com ângulos da hélice iguais a 30 graus. Se a folga da seção de mistura canelada for corretamente desenhada, a queda de pressão na mistura, para um fluido Newtoniano, pode ser expressa como [8]:

$$\Delta P = \frac{6\mu z_m}{F_p W H^3} [V_1^0(0) - F_d W (H - \delta) v_b \cos \phi] \quad (14)$$

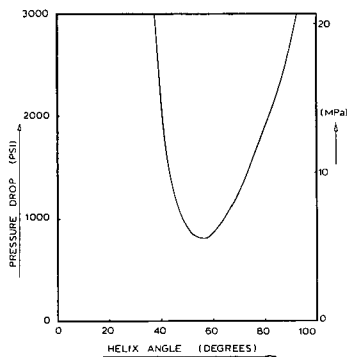


Fig. 16. Queda de pressão versus ângulo da hélice.

A partir dessa expressão, o ângulo helicoidal ótimo para a queda de pressão mínima pode ser determinado definindo a primeira derivada da queda de pressão, em função do ângulo da hélice, como sendo igual a zero. O ângulo da hélice ótimo fica então:

$$\phi^* = 52.24 \quad [\text{graus}] \quad (15)$$

Isto pode ser verificado graficamente, plotando-se a queda de pressão contra o ângulo helicoidal, como representado na Figura 16. Claramente, a seção de mistura "UC" com seu ângulo helicoidal de 90 graus dará valores elevados de queda de pressão. Por outro lado, a seção de mistura "Egan" com seu ângulo helicoidal de 30 graus também resultará em altos valores na queda de pressão. É irônico que o ângulo helicoidal que fornece os menores valores de queda de pressão não seja usado em seções de mistura caneladas comercialmente disponíveis. Valores elevados de queda de pressão devem ser evitados, porque isto causa uma diminuição na descarga, um aumento no tempo de residência, incremento no acúmulo de calor no material, e com isto, a probabilidade de degradação. Também, como resultado da viscosidade reduzida à temperaturas mais elevadas, a ação de mistura dispersiva será reduzida. Uma comparação de dispositivos de mistura dispersiva comerciais é mostrada na Tabela 2.

TABELA 2 - COMPARAÇÃO DE DISPOSITIVOS PARA MISTURA DISPERSIVA

Mixing Section	A	B	C	D	E	F
Blister (16)*	--	o	-	+	+	-
Egan (25)	-	++	++	+	+	++
Gregory (16)	-	-	-	+	+	-
LeRoy (22)	-	-	++	+	+	++
Troester (23)	o	-	++	+	+	++
Dray (20)	-	+	+	+	+	-
Zorro (26)	++	++	++	+	-	++
Helical LeRoy (28)	++	++	++	+	+	++

++ = bom; + razoável; 0 = neutro; - = fraco; -- = muito fraco.

- A. Queda de pressão
- B. Pontos moitos
- C. Limpeza do barril
- D. Facilidade de operação
- E. Custo de fabricação
- F. Mistura uniforme

CONCLUSÕES

Como foi demonstrado nas seções anteriores, é possível fazer uma abordagem lógica no projeto de roscas para extrusão. Já que a teoria de extrusão é razoavelmente bem entendida, faz sentido usar esta teoria para otimizar as roscas para o transporte de sólidos, para a fusão, para o transporte do fundido, e para a mistura. A mesma abordagem pode ser feita na otimização da devolatilização.

A suposição que as características de projetos de roscas mais utilizadas também resultam no melhor desempenho nem sempre é correta. Portanto, é importante analisar criteriosamente as características das roscas de extrusão utilizadas atualmente, e determinar se melhorias significativas podem ser obtidas no desempenho do processo de extrusão, através da incorporação de algumas das características de aprimoramento de desempenho discutidas neste artigo.

NOMENCLATURA

Letras romanas minúsculas

- f_b = coeficiente de fricção no barril
- f_s = coeficiente de fricção na rosca
- g_a = gradiente de pressão axial
- k_m = condutividade térmica do polímero fundido
- m = índice de consistência
- n = índice da lei das potências
- p = número de filetes em paralelo
- v = velocidade
- v_{sz} = velocidade do leito de sólidos na direção z
- v_b = velocidade do barril
- v_{bz} = velocidade do barril na direção z
- x = coordenada transversal
- y = coordenada normal
- z = coordenada ao longo do canal

Caracteres Gregos

- δ = folga no filete da rosca
- Ω = função definida na equação 6
- θ = ângulo no transporte de sólidos
- μ = viscosidade Newtoniana
- $\pi = 3,1415\dots$
- ρ_b = densidade do leito de sólidos
- τ = tensão de cisalhamento
- τ_a = tensão admissível
- ϕ = ângulo helicoidal do filete da rosca
- ΔH = diferença de entalpia
- Δv = velocidade relativa entre o barril e o leito de sólidos
- $\Delta T_b = T_b - T_m$

Letras Romanas Maiúsculas

D = diâmetro da rosca
D_b = diâmetro do barril
F_d = fator de forma no fluxo de arraste
F_p = fator de forma no fluxo de pressão
H = profundidade do canal
N = velocidade da rosca
P = pressão
P₀ = pressão inicial
R_c = diâmetro do núcleo da rosca
R_s = diâmetro da raiz da rosca
T_b = temperatura do barril
T_m = temperatura de fusão
V = vazão volumétrica
W = largura do canal

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – FENNER, R.T. and CARLILE, J. – Mech. Eng. Sci., 20, 73-78 (1978).
- 2 – RAUWENDAAL, C. – Doctoral Thesis, Twente University, The Netherlands (1988).
- 3 – LUCIUS, W. – Kunststoffe, 63, 7, 433-435 (1973).
- 4 – LAI FOOK, R.A. and WORTH, R.A. – SPE ANTEC, Washington, DC, 450-452 (1978).
- 5 – WINTER, H.H. – SPE ANTEC, New Orleans, 170-175 (1979).
- 6 – BLAKESLEE, T.R. et al., US Patent 4, 321, 229.
- 7 – RAUWENDAAL, C. – “Polymer Extrusion”, Carl Hanser Verlag (1986).
- 8 – RAUWENDAAL, C. – Polym. Eng. Sci., 26, 1245-1253 (1986).
- 9 – INGEN HOUSZ, J.F., US Patent, 4, 218, 146.
- 10 – RAUWENDAAL, C. – Polym. Eng. Sci., 26, 1240-1244 (1986).
- 11 – RAUWENDAAL, C. – Int. Pol. Proc., 3, 123-133 (1988).
- 12 – RAUWENDAAL, editor, “Mixing in Polymer Processing”, Marcel Dekker, New York (1991).
- 13 – SPENCER, R.S. and WILEY, R.M. – J. Colloid Sci., 6, 133 (1951).
- 14 – MOHR, W.D.; SAXTON, R.L. and JEPSON, C.H. – Ind. Eng. Chem., 49, 1855 (1957).
- 15 – ERWIN, L. – Polym. Eng. Sci., 18, 1044-1047 (1978).
- 16 – OTTINO, J. – “The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport”, Cambridge Univ. Press (1989).
- 17 – LEROY, G. – US Patent 3, 486, 192.
- 18 – GREGORY, R. and STREET, L. – US Patent 3, 411, 179.