

EQUILÍBRIO DO ESCOAMENTO EM CABEÇAS DE EXTRUSÃO PARA PERFIS

J. M. Nóbrega, O. S. Carneiro, F. T. Pinho*, P. J. Oliveira**

Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800 Guimaraes,
Portugal

* Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto, Rua dos Bragas, 4050-123 Porto, Portugal

** Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior,
Rua Marquês D'Ávila e Bolama, 6200 Covilhã, Portugal

Resumo: Neste trabalho é proposta uma metodologia global para o desenho reológico de cabeças de extrusão para perfis. Nesta, consideram-se os limites do polímero fundido (em termos da ocorrência de defeitos de origem reológica e de valores máximos admissíveis para a pressão e para o aumento de temperatura por dissipação viscosa), os efeitos pós-extrusão (contração devida ao arrefecimento, estiramento promovido pelo puxo e inchamento à saída do canal de fluxo) e o equilíbrio do escoamento. Neste estudo inclui-se também a primeira fase de implementação da referida metodologia, dando especial relevância ao problema do equilíbrio do escoamento, considerando a zona mais relevante da cabeça de extrusão (zona paralela e pré-adaptador). A geração da primeira geometria tentativa é realizada automaticamente a partir da geometria e dimensões requeridas para o perfil. O algoritmo proposto utiliza um *software* de volumes finitos para modelar o escoamento tri-dimensional.

Abstract: In this work a global methodology for the rheological design of extrusion dies for profiles is proposed. The methodology considers the limits of the polymer melt (in terms of occurrence of rheological flow defects and maximum admissible values for pressure and temperature increase promoted by viscous dissipation), post-extrusion phenomena (shrinkage during cooling, draw-down promoted by pulling and die swelling) and flow balancing. This study includes the first stage of implementation of the methodology, where particular attention is given to the problem of flow balancing, considering the most relevant zone of the extrusion die (parallel zone and pre-adapter). The initial trial geometry is automatically generated as a function of the geometry and dimensions requested for the profile. The proposed algorithm is based on a finite-volume code for three-dimensional flow prediction.

Palavras-chave: cabeças de extrusão, perfis, projecto reológico, volumes finitos

1. Introdução

O desempenho de perfis termoplásticos extrudidos depende, entre outros factores, do desenho do canal de fluxo da cabeça de extrusão e das condições operatórias adoptadas durante a sua extrusão. O projecto adequado do canal de fluxo deve considerar a obtenção do perfil requerido (em termos de geometria e dimensões), ao mais alto débito, com um bom acabamento superficial e apresentando um nível mínimo de tensões internas e sem ocorrência de degradação térmica do polímero. Assim, o projecto reológico de cabeças de extrusão deve ter em consideração diversos aspectos, nomeadamente:

- i) o estabelecimento do débito máximo de operação que garanta a não ocorrência do fenómeno de pele de tubarão à saída do canal de fluxo;
- ii) a definição do ângulo máximo de convergência do adaptador que, nas condições operatórias definidas, garanta a não ocorrência de fractura de fundido promovida pelo escoamento predominantemente extensional aí desenvolvido;
- iii) a correcção das dimensões da secção transversal da zona paralela de modo a compensar os efeitos dos fenómenos pós-extrusão de maior relevância na definição das dimensões da secção transversal do extrudido (contração devida ao arrefecimento, estiramento promovido pelo puxo e inchamento à saída do canal de fluxo);
- iv) a definição da geometria e dimensões do pré-adaptador e do comprimento de cada uma das zonas elementares consideradas na zona paralela, de modo a assegurar um escoamento equilibrado à saída do canal de fluxo; esta condição é fundamental para a definição das dimensões da secção transversal do extrudido e/ou garantia de uma orientação uniforme induzida pelo puxo;
- v) o controlo da queda de pressão total verificada e do aumento de temperatura do fundido por dissipação viscosa.

O carácter viscoelástico dos polímeros fundidos, aliado ao elevado número de fenómenos e restrições a considerar, tornam complexa a tarefa de projecto que, por isso, envolve frequentemente um número elevado de tentativas sucessivas e se baseia fortemente nos conhecimentos/experiência do projectista. Apesar de já existirem alguns programas de simulação do escoamento de polímeros fundidos em cabeças de extrusão [1-5], o que facilita bastante o seu projecto, continua a ser necessária a intervenção do utilizador na tomada de decisões que determinam a geração das sucessivas geometrias tentativas conducentes a uma solução final satisfatória. Para além disso, esses programas raramente incluem a modelação da totalidade dos fenómenos relevantes e, por exemplo, só muito recentemente foi incluída a modelação de alguns fenómenos pós-extrusão [1,2]. No caso do inchamento, já é possível definir, de forma automática, o contorno da zona paralela da cabeça de extrusão capaz de gerar a geometria especificada para o perfil, usando para o efeito uma abordagem do tipo ‘formulação inversa’ [6,7]. O problema do equilíbrio do escoamento também só raramente é abordado na literatura [8-10]. Apesar de incompletas, a generalidade destas ferramentas de modelação é de utilização difícil e requer tempos de CPU incompatíveis com as necessidades práticas de projecto.

Neste trabalho propõe-se uma metodologia de concepção do canal de fluxo de cabeças de extrusão para a produção de perfis de geometria complexa, que procura incluir os aspectos mais relevantes anteriormente referidos e incorporar *know-how* que permita atingir mais rapidamente uma solução final exequível, do ponto de vista construtivo e operacional. A estrutura adoptada nesta metodologia permitirá a sua posterior integração num processo automático de optimização da geometria do canal de fluxo.

Considerando a complexidade do problema e tendo como certa a necessidade de efectuar um grande número de simulações até se atingir a solução final, adoptou-se um programa de simulação de escoamentos baseado no método dos volumes finitos [9] para modelar o escoamento tri-dimensional verificado no canal de fluxo, de modo a reduzir os custos computacionais requeridos [10].

2. Metodologia de projecto

Na metodologia proposta neste trabalho dá-se ênfase ao problema do equilíbrio do escoamento, em virtude de no caso particular dos perfis sem simetria radial a zona paralela ser inerentemente desequilibrada. Por outro lado, o equilíbrio desejado não pode ser conseguido pela alteração das dimensões da secção transversal da zona paralela, já que afectaria igualmente as dimensões do extrudido. Assim, aquele equilíbrio terá de ser assegurado a montante, numa zona especificamente criada para o efeito, o pré-adaptador (zona de contornos geométricos semelhantes aos da zona paralela, localizada entre o adaptador e a zona paralela propriamente dita). Como consequência, a selecção da solução construtiva da zona do pré-adaptador deve ser tal que permita o controlo local da resistência ao escoamento.

Na Figura 1 está apresentada a metodologia sob a forma de fluxograma. Este, inclui os dados de entrada necessários, sequência de acções, verificações e soluções a adoptar nos casos em que se excedem condições limite. As principais etapas (blocos numerados de 1 a 16) são descritas em seguida:

Bloco 1 - A secção transversal da zona paralela, considerada igual à do perfil a extrudir, é dividida em secções elementares (SE) rectangulares.

Blocos 2/3 - Assumindo o equilíbrio de escoamento, calculam-se as dimensões da secção transversal da zona paralela (considerando as correcções devidas aos fenómenos pós-extrusão) e o débito máximo (que origine uma tensão de corte na parede inferior à tensão de corte crítica

do material, $\tau_{\text{crít}}$, que determina a ocorrência de pele de tubarão). Para o efeito utiliza-se uma modelação analítica aplicada a cada uma das SE consideradas, assumindo um escoamento isotérmico entre placas paralelas. Dada a interdependência entre dimensões e débito esta fase é, necessariamente, iterativa [11].

Bloco 4 - As razões entre os comprimentos elementares devem assegurar quedas de pressão similares para todos os ‘trajectos’ de fluxo possíveis. Um ‘trajecto’ é o canal de fluxo definido pela zona paralela de uma SE. As quedas de pressão correspondentes a cada SE são determinadas analiticamente.

Bloco 5 – Obtidas as razões de comprimentos, e considerando a gama de valores L (comprimento) / H (dimensão característica) admissível [12], definem-se os valores dos comprimentos elementares. A razão L/H deve ser suficientemente elevada para tornar o inchamento independente, ou pouco dependente, do fluxo extensional verificado a montante.

Bloco 6 - Define-se a solução construtiva a adoptar, em função da geometria do perfil a obter. Aquela deve prever a possibilidade de alterar o comprimento das zonas paralelas das diferentes SE e as dimensões da secção transversal da entrada do pré-adaptador (se possível, de forma independente), de modo a facilitar a obtenção do equilíbrio de escoamento. Como solução inicial deve optar-se por não utilizar paredes separadoras entre as diferentes SE.

Bloco 7 – Estabelece-se a geometria inicial do canal de fluxo, isto é, pré-adaptador (PA) e zona paralela (ZP).

Bloco 8 – Cria-se o modelo do problema (‘PA+ZP’). A modelação numérica do escoamento (não isotérmico, tridimensional e viscoelástico) permite então obter os caudais em cada uma das SE e, conseqüentemente, determinar as velocidades médias de escoamento.

Bloco 9 – Após verificação/correção de condições limite (relacionadas com a queda de pressão, tensão de corte e tensão normal) e do equilíbrio do escoamento, bem como confirmação da impossibilidade de usar um débito superior ao adoptado, procede-se à modelação numérica do escoamento em ‘PA+ZP+superfície livre (após canal de fluxo)’ de modo a determinar as dimensões do extrudido.

Bloco 10 – Se as dimensões do extrudido forem as requeridas, gera-se, de modo automático, a geometria do adaptador (A), para efectuar a transição extrusora/pré-adaptador.

Bloco 11 – Efectua-se modelação global do escoamento (‘A+PA+ZP+ superfície livre’).

Bloco 12 – A alteração do comprimento das zona paralelas das SE e/ou da secção transversal da entrada do pré-adaptador devem ser realizadas no sentido de equilibrar o escoamento.

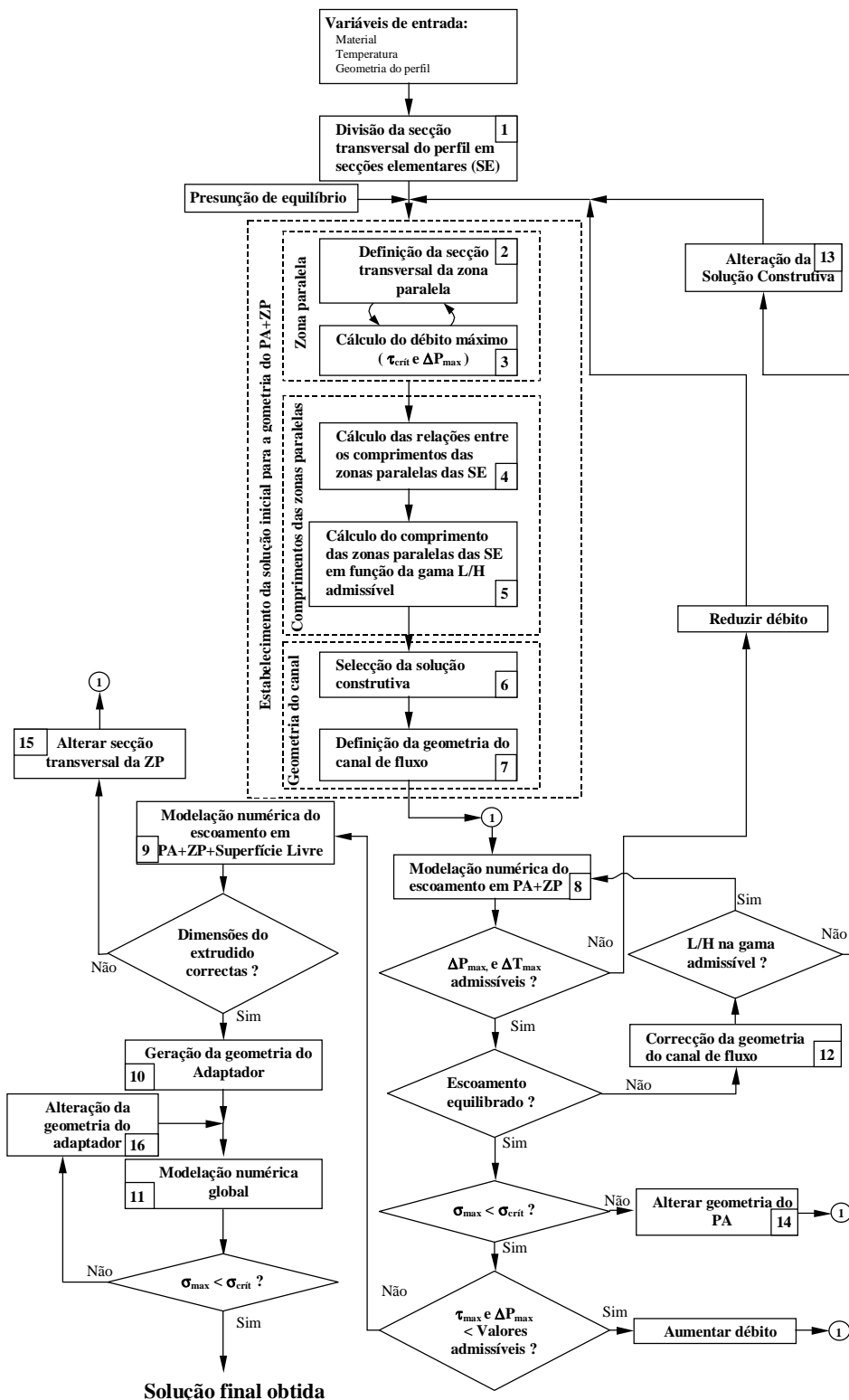


Figura 1 – Metodologia do projecto reológico de cabeças de extrusão para perfis.

Bloco 13 – Se a razão L/H de qualquer das SE se tornar inferior ao valor admissível, será necessário iniciar a resolução do problema, considerando outro tipo de solução construtiva (paredes separadoras entre as SE).

Bloco 14 – Se a tensão normal crítica do fundido, $\sigma_{\text{crít}}$, fôr ultrapassada, reduz-se a convergência do pré-adaptador.

Bloco 15 – Se as dimensões do extrudido não forem as requeridas devem alterar-se as dimensões da secção transversal da zona paralela.

Bloco 16 – Se a tensão normal crítica do fundido fôr ultrapassada, altera-se a convergência do adaptador, aumentando o seu comprimento.

3. Exemplo de aplicação

Na Figura 2-a apresenta-se o tipo de secção transversal da zona paralela das cabeças de extrusão a analisar e a sua subdivisão em 4 zonas de controlo do equilíbrio (Z1 a Z4). Esta secção transversal proporcionará necessariamente um escoamento desequilibrado devido à existência de uma subsecção (Z1) de espessura inferior à das restantes. De modo a facilitar a obtenção de equilíbrio de escoamento considerou-se um pré-adaptador parametrizado com as variáveis L_a , L_b e b (ver Figura 2-b). Foram consideradas duas cabeças de extrusão às quais correspondem secções transversais com $a=1\text{mm}$ (cross) e $a=1.5\text{mm}$ (cross2).

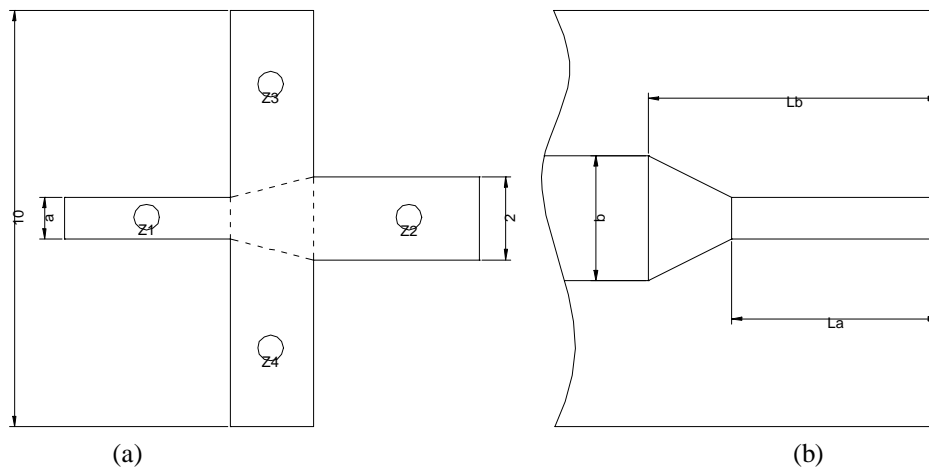


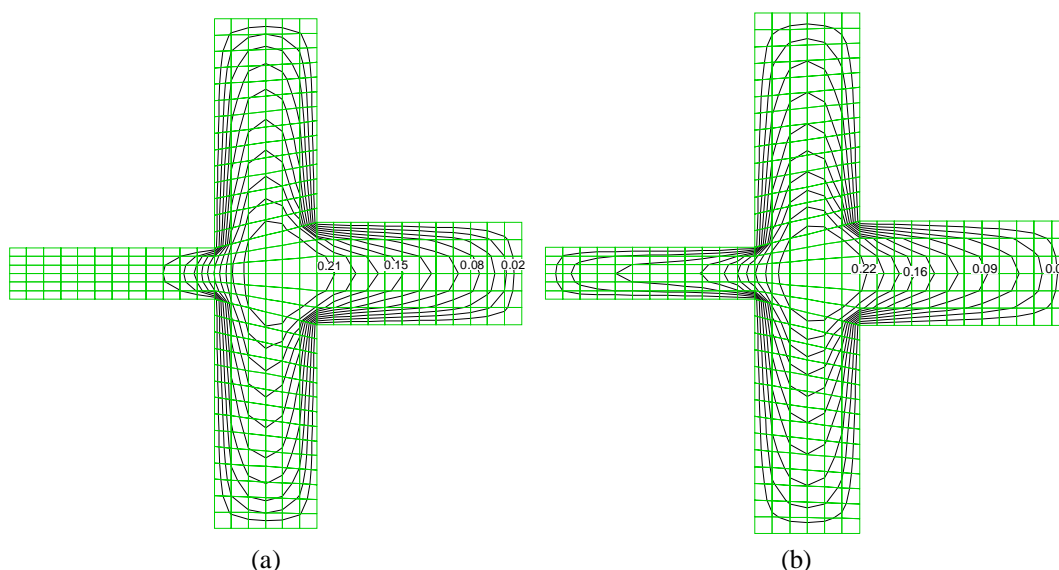
Figura 2 – Canal de fluxo estudado (dimensões em mm): (a) secção transversal e (b) vista lateral.

Para determinar a influência de cada um dos parâmetros do pré-adaptador no equilíbrio de escoamento, realizaram-se simulações nas condições ilustradas na Tabela 1, as quais foram agrupadas em três estudos, que consistiram na variação conjunta dos parâmetros L_a e L_b (estudo I), na variação de b (estudo II) e na variação da convergência, por alteração de L_b (estudo III), da subsecção Z1.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros (em mm) utilizados nas simulações realizadas com as duas geometrias (cross/cross2).

	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	u_1	u_2	u_3	u_4	c_1	c_2	c_3	c_4
L_a	10	7	4	3	2	1	4	4	4	4	4	4	4	4
L_b	11.5	9.5	5.5	4.5	3.5	2.5	5.5	5.5	5.5	5.5	8	6	5	4.5
b	3	3	3	3	3	3	2	2.5	3.5	4	3	3	3	3

Para as simulações foi utilizado um polipropileno homopolímero, cujo comportamento reológico foi modelado por uma lei de potência generalizada (Bird Carreau), utilizando parâmetros calculados a partir de dados obtidos por reometrias capilar e rotacional. Para as duas geometrias utilizadas o débito foi imposto de modo a obter uma velocidade média de 0.1m/s à saída do canal de fluxo.

**Figura 3** – Linhas iso-velocidade (m/s) para as simulações ‘cross-11’ (a) e ‘cross-16’ (b).

As linhas iso-velocidade correspondentes a duas situações extremas de distribuição de escoamento, para a geometria ‘cross’, são apresentadas na Figura 3. Como se pode observar, o desequilíbrio verificado na simulação ‘cross-11’ (Figura 3-a) foi atenuado alterando os parâmetros L_a e L_b para os valores correspondentes à simulação ‘cross-16’ (Figura 3-b). Apesar de se ter conseguido atingir o objectivo desejado deve referir-se que o comprimento resultante para a zona paralela é excessivamente pequeno (ver Figura 1-Bloco 5).

Nos gráficos da Figura 4 são apresentadas as velocidades médias de escoamento verificadas nas diferentes subsecções das geometrias ‘cross’ (a) e ‘cross2’ (b). A análise destes gráficos

permite concluir que: i) a localização da zona de transição do pré-adaptador (isto é, a variação conjunta dos parâmetros L_a e L_b , ilustrada no estudo l) é o factor que mais influencia a distribuição de escoamento; ii) a variação da espessura da entrada do pré-adaptador (estudo u) e da convergência (estudo c) tem uma influência reduzida.

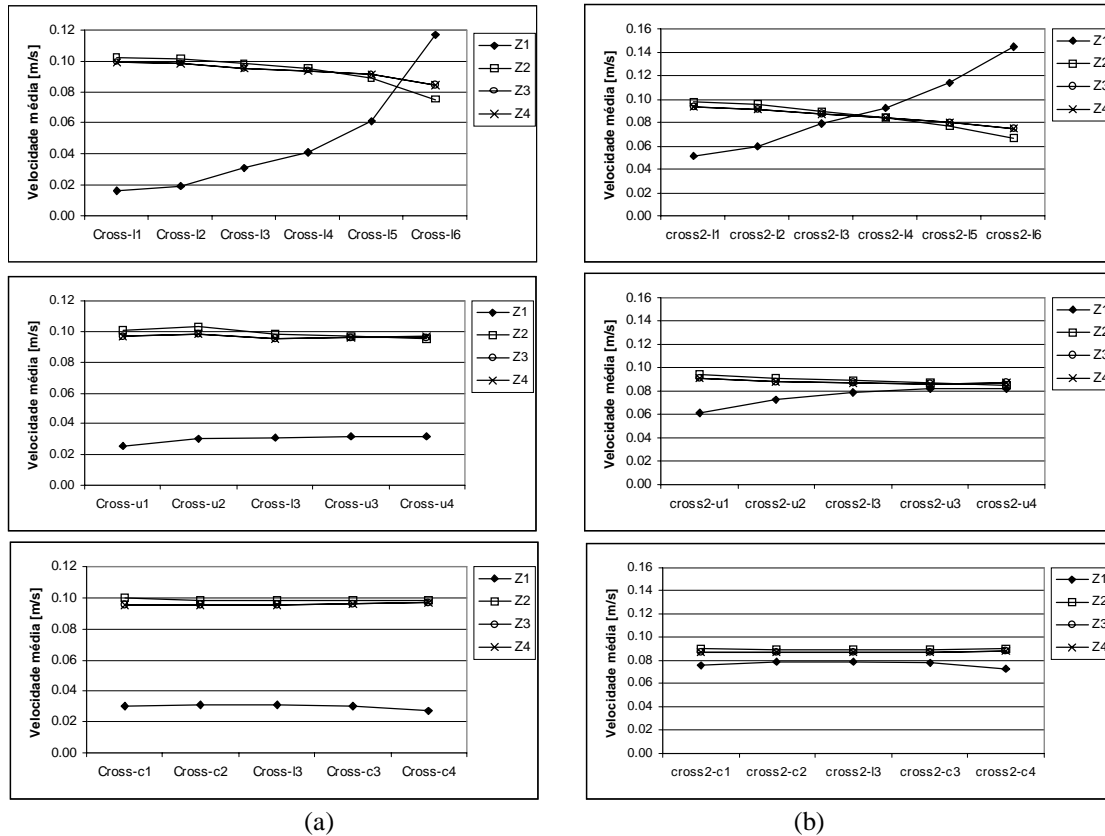


Figura 4 – Velocidades médias de escoamento obtidas para cada uma das subsecções (Z1 a Z4) consideradas. Simulações realizadas nas geometrias: (a) 'cross' e (b) 'cross2'

4. Conclusões

Este trabalho permitiu identificar as principais etapas necessárias para o desenho do canal de fluxo de cabeças de extrusão para perfis e estabelecer um algoritmo para o realizar.

Mostrou-se que a existência do pré-adaptador permite sistematizar o processo de pesquisa do equilíbrio de escoamento e avaliou-se a importância relativa dos seus parâmetros geométricos neste processo. Verificou-se que para perfis constituídos por zonas de espessura muito diferente, a solução construtiva adoptada obriga a uma redução excessiva do comprimento da zona paralela das sub-seções mais restritivas. Assim, nestes casos, poderá

haver necessidade de recorrer à introdução de separadores de fluxo entre as diferentes sub-seções.

Referências

1. Polyflow, Fluent Inc.
2. Diecalc, Rapra Technology Ltd.
3. G. Menges, M. Kalwa, J. Schmidt, Kunstst., **77**, 797 (1987)
4. J. Vlachopoulos, P. Behncke, J. Vlcek, Adv. Polym. Tech., **9**, 147 (1989)
5. D. H. Sebastian, R. Rakos, Adv. Polym. Tech., **5**, 333 (1985)
6. H. -P. Wang, Plastics Technology, February (1996)
7. V. Legat, J. M. Marchal, International Journal for Numerical Methods in Fluids, **16**, 29 (1993)
8. M. P. Reddy, E. G. Schaub,, L. G. Reifschneider, H. L. Thomas, Design and Optimization of Three Dimensional Extrusion Dies Using Adaptive Finite Element Method, Actas da ANTEC 99, 1999
9. P. J. Oliveira, F. T. Pinho, J. Non-Newt. Fluid Mech., **79**, 1 (1998)
10. S. -C. Xue, N. Phan-Thien, R. I. Tanner, J. Non-Newt. Fluid Mech., **74**, 195 (1998)
11. O. S. Carneiro, J. A. Covas, Plast. Rubb. Comp. Proc. Apppl., **24**, 79 (1995)
12. W. Michaeli, Extrusion Dies for Plastic and Rubber, Hanser Pub., 1992