



VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional

Universidade de Évora

14 a 16 de Abril de 2003

## OPTIMIZAÇÃO DO EQUILÍBRIO DE FLUXO EM CABEÇAS DE EXTRUSÃO PARA A PRODUÇÃO DE PERFIS

J. M. Nóbrega<sup>1</sup>, O. S. Carneiro<sup>1</sup>, P. J. Oliveira<sup>2</sup>, F. T. Pinho<sup>3</sup>

### RESUMO

O equilíbrio de fluxo é um dos requisitos fundamentais para a obtenção de um perfil extrudido com um nível reduzido de tensões internas. Para atingir este objectivo, o fluxo do polímero fundido no canal definido pela cabeça de extrusão deve ser correctamente descrito, o que exige um código numérico capaz de modelar tanto os padrões 3D de escoamento desenvolvidos, como a variações locais de temperatura promovidas por dissipação viscosa. Neste trabalho são descritos a implementação e o funcionamento de uma metodologia desenvolvida para a obtenção do equilíbrio de fluxo em cabeças de extrusão para a produção de perfis. O código elaborado é composto por rotinas de modelação numérica do escoamento 3D baseadas no método dos volumes finitos, necessárias ao cálculo do escoamento não isotérmico, e por dois algoritmos de optimização (um baseado no método SIMPLEX de programação não-linear e outro no processo experimental tentativa-erro vulgarmente adoptado no desenho deste tipo de ferramentas), ambos associados a uma função objectivo que direcciona a procura da solução óptima. As rotinas implementadas permitem a utilização de 3 estratégias alternativas para equilibrar o fluxo (baseadas no ajuste das espessuras e/ou dos comprimentos da parte terminal do canal de fluxo, a zona paralela).

### 1. INTRODUÇÃO

No passado, o projecto de cabeças de extrusão era baseado num processo tentativa-erro exclusivamente experimental, essencialmente dependente da experiência do projectista e excessivamente dispendioso, tanto em termos temporais como em material e equipamento [Szarvazy et al (2000), Sienz et al (2001)]. Hoje em dia, impulsionado pelo desenvolvimento de rotinas numéricas capazes de modelar o escoamento de polímeros fundidos [Polyflow, Flow 2000, Menges et al (1987), Vlachoupoulos et al (1989), Sebastian e Rakos (1985)], este

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior.

<sup>3</sup> Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte, DEMEGI, Faculdade de Engenharia da Universidade do Minho.

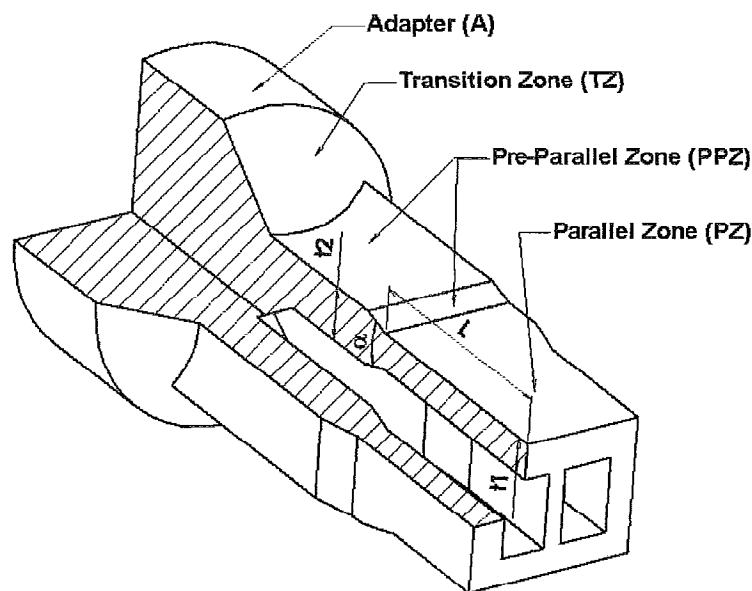
processo tentativa-erro está a evoluir progressivamente de experimental para numérico. Contudo, a geração das diferentes tentativas e as decisões inerentes ao processo continuam a ser acometidas ao projectista [Szarvazy et al (2000)].

O equilíbrio de fluxo é um dos requisitos fundamentais para a obtenção de um perfil extrudido com um nível reduzido de tensões internas. Como os padrões de escoamento desenvolvidos dependem da geometria do canal de fluxo, das propriedades reológicas do polímero fundido e da forma como estas variam com a temperatura e taxa-de-corte, para atingir este objectivo o escoamento desenvolvido no canal de fluxo deve ser descrito correctamente, o que exige a utilização de um código numérico capaz de prever os padrões complexos de escoamento 3D que ocorrem no canal e as correspondentes variações de temperatura promovidas por dissipação viscosa.

A metodologia de obtenção do equilíbrio de fluxo aqui descrita é uma dos componentes de uma mais abrangente anteriormente desenvolvida e apresentada [Carneiro et al (2001), Nóbrega et al 2001a, Nóbrega et al 2001b]. Este trabalho foca os desenvolvimentos recentemente implementados na referida metodologia de desenho de cabeças de extrusão.

## 2. METODOLOGIA

A aplicação da metodologia de balanceamento do fluxo implica a divisão do canal de fluxo em quatro zonas distintas: a zona paralela (PZ), a zona pré-paralela (PPZ), a zona de transição (TZ) e o adaptador (A), ilustradas na Figura 1. As secções transversais da PZ e PPZ são divididas em secções elementares (ES) [Carneiro et al (2001)], zonas definidas por parâmetros geométricos ajustáveis que permitem controlar a resistência local ao fluxo, e as zona de intersecção (I) das diferentes ES (ver Figura 2). Os parâmetros controláveis da PPZ são os indicados na Figura 1: distância até ao final do canal de fluxo, isto é, comprimento de espessura constante,  $L$ , ângulo de convergência,  $\alpha$ , e razão de compressão  $t_2/t_1$  [Carneiro et al (2001), Nóbrega et al 2001a, Nóbrega et al 2001b].

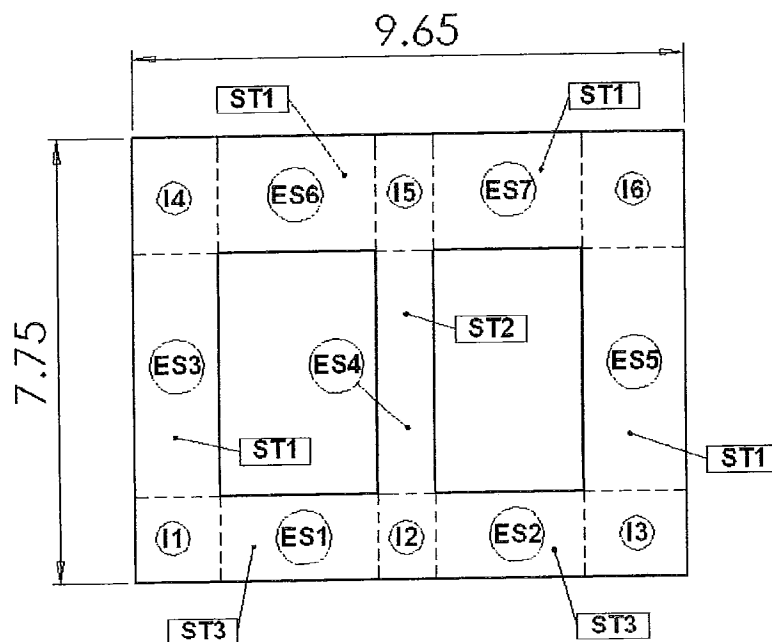


**Figura 1** – Canal de fluxo típico de uma cabeça de extrusão para a produção de perfis, identificação das suas zonas geométricas principais e dos parâmetros geométricos necessários à definição da zona pré-paralela (PPZ).

O próximo passo consiste na selecção da estratégia de balanceamento de fluxo a adoptar em cada ES. As estratégias disponíveis são as seguintes:

- i) procurar o comprimento que melhor aproxima a velocidade local da velocidade média da secção transversal do perfil (ST1) [Sienz et al (2001), Svabik et al (1999), Carneiro et al (2001), Nóbrega et al (2001a), Nóbrega et al (2001b)];
- ii) procurar a espessura que garanta o débito local necessário à obtenção da espessura pretendida após o estiramento promovido pelos rolos de puxo (ST2) [Sienz et al (2001), Svabik et al (1999)];
- iii) procurar a espessura que melhor aproxima a velocidade local da velocidade média da secção (ST3). Esta estratégia combina as vantagens das duas anteriores, com o inconveniente de impossibilitar a imposição da espessura final após puxo.

A metodologia proposta neste trabalho permite a utilização combinada das três estratégias, com o objectivo de obter uma geometria para o canal de fluxo, que simultaneamente minimize as tensões internas induzidas no perfil extrudido e a sensibilidade a alterações nas condições de processamento.



**Figura 2** – Secção transversal da zona paralela (PZ) da cabeça de extrusão utilizada no exemplo de aplicação (dimensões em mm): subdivisão em secções elementares (ES), intersecções (I) e identificação da estratégia de optimização (ST) adoptada em cada ES.

Os locais mais restritivos do canal de fluxo são as zonas pré-paralela (PPZ) e paralela (PZ), ilustradas na Figura 1. Assim, quando se procura balancear o fluxo, será suficiente modelar o escoamento nessas zonas, não só porque dominam a distribuição do fluxo [Sienz et al 2001, Svabik et al 1999, Carneiro et al (2001), Nóbrega et al 2001a], mas também porque são zonas onde a dissipação viscosa é mais significativa.

### 3. PROCESSO DE OPTIMIZAÇÃO

O objectivo da metodologia de optimização desenvolvida é encontrar de forma automática o conjunto de parâmetros geométricos da PPZ que melhor aproximam a situação

ideal de equilíbrio de fluxo. A Figura 3 ilustra esquematicamente a integração das diferentes rotinas necessárias.

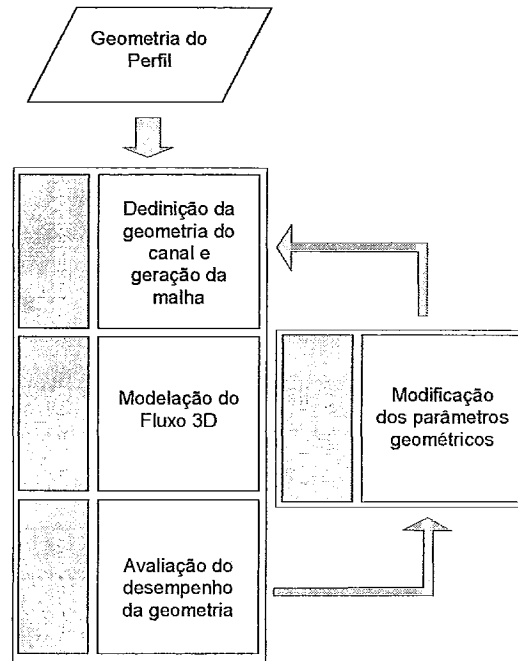


Figura 3 – Metodologia de otimização

Foram implementados dois algoritmos de otimização: um baseado no método SIMPLEX de programação não-linear (SM) [Rao (1984)] e outro que simula o procedimento experimental tentativa-e-erro (EM) utilizado no fabrico destas ferramentas (i.e., após cada tentativa as alterações propostas vão no sentido de facilitar o fluxo onde o débito é inferior ao requerido, e vice-versa).

Ao longo do processo de cálculo a qualidade de cada geometria tentativa, automaticamente gerada, é avaliada através de uma função objectivo ( $F_{obj}$ ), que combina dois critérios – equilíbrio de fluxo e razão  $L/t$  – pesados pela área da secção transversal correspondente:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \alpha \left( 1 - \frac{V_i}{V_{obj,i}} \right)^2 + k(1-\alpha) \left[ 1 - \frac{(L/t)_i}{(L/t)_{min}} \right]^2 \right] \frac{A_i}{A} \right\} \quad (1)$$

com  $k = 0$  para todas as zonas I e para ES onde  $(L/t)_i \geq (L/t)_{min}$  e  $k = 1$  para as ES onde  $(L/t)_i < (L/t)_{min}$

onde:

$n$  – nº total de secções elementares (ES) e de zonas de intersecção (I);

$V_{obj,i}$ ,  $V_i$  – Velocidades médias real e pretendida para o fundido em cada zona, respectivamente;

$(L/t)_i$  - razão entre comprimento e espessura de cada ES;

$(L/t)_{min}$  - valor mínimo recomendado para a razão  $L/t$ ;

$\alpha$  - peso relativo;

$A$ ,  $A_i$  – áreas da secção transversal do canal de fluxo e de cada ES, respectivamente.

O valor da função objectivo decresce com o aumento do desempenho da cabeça de extrusão, sendo igual a zero para uma geometria com fluxo perfeitamente equilibrado e com os comprimentos de todas as ES dentro da gama admissível.

Durante o processo de optimização o gerador de malhas é utilizado para gerar automaticamente a malha em cada geometria proposta pelo algoritmo de optimização. De modo a melhorar a eficiência e/ou precisão do cálculo numérico as rotinas estão programadas para gerar malhas sem discontinuidades no tamanho das células, e para as refinar em locais onde são esperados gradientes elevados para as diversas variáveis (Figura 4).

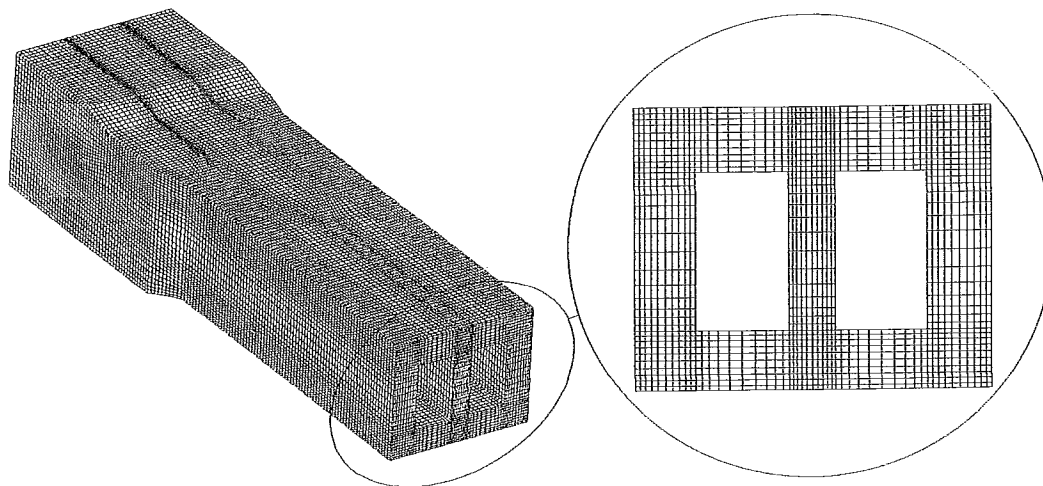


Figura 4 – Malha típica utilizada nos cálculos.

Com o objectivo de reduzir o tempo dispendido nos cálculos o processo inicia-se com malhas grosseiras, efectuando refinamentos progressivos à medida que se aproxima da solução final.

#### 4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O polímero utilizado nas simulações foi um polipropileno homopolímero, Novolen PPH 2150, produzido pela Targor. O seu comportamento reológico foi caracterizado experimentalmente através de reometria capilar e rotacional, efectuadas a 210°C, 230°C e 250°C. As curvas obtidas para a viscosidade de corte foram ajustadas a uma equação constitutiva tipo Bird-Carreau, para considerar o efeito da taxa de corte, e uma lei de Arrhenius, para considerar o efeito da temperatura, o que permitiu obter os seguintes parâmetros:  $\eta_{\infty}$  (Pa.s)=0,  $\eta_0$  (Pa.s)= $5.58 \times 10^4$ ,  $\lambda$  (s)=3.21,  $n=0.3014$ ,  $\alpha$  (°C)=  $2.9 \times 10^3$  e  $T_a$  (°C)=230.

A metodologia de balanceamento do fluxo foi utilizada para otimizar a cabeça de extrusão ilustrada na Figura 1, adoptando a divisão em secções elementares (ES) ilustrada na Figura 2. Neste exemplo, a estratégia ST3 foi seleccionada para as ES1 e ES2, a ST1 para as ES3, ES5, ES6 e ES7 e a ST2 para a ES4 (ver Figura 2).

As dimensões iniciais, ou de referência, utilizadas para o canal de fluxo estão ilustradas na Tabela 1. Para as restantes dimensões da PPZ, definidas na Figura 1, foi assumido um valor de 3 mm para a espessura de entrada ( $t_2$ ) e um ângulo de convergência ( $\alpha$ ) de 30°, para todas as ES.

**Tabela 1** – Dimensões iniciais para o canal de fluxo

ES	1	2	3	4	5	6	7
$t_i$ [mm]	1.5	1.5	1.5	1.0	1.8	2.0	2.0
$L_i$ [mm]	22.5	22.5	22.5	15.0	27.0	30.0	30.0

A geometria foi otimizada utilizando tanto a 'metodologia experimental' (EM) como o método SIMPLEX (SM), considerando-se para ambas 5 variáveis controláveis, nomeadamente: Opt1 para a espessura das ES1 e ES2, Opt2 para o comprimento da ES3, Opt3 para a espessura da ES4, Opt4 para o comprimento da ES5 e Opt5 para os comprimentos das ES6 e ES7. A espessura das ES e ES2 e o comprimento das ES6 e ES7 foram consideradas iguais por questões de maquinaria.

As condições de processamento utilizadas estão definidas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Condições de processamento

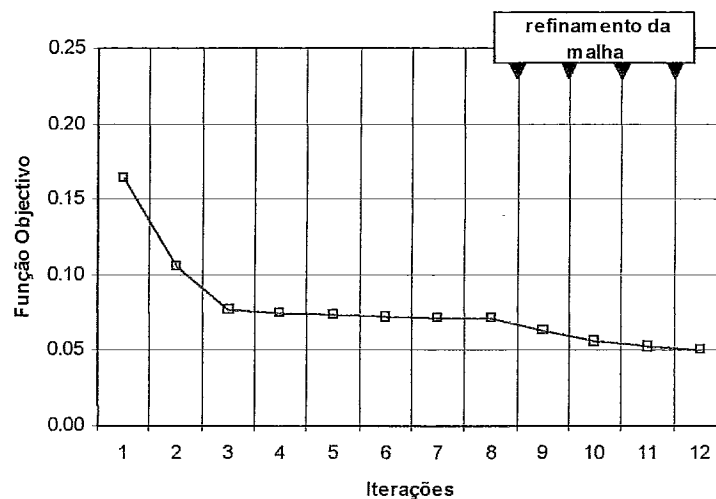
<b>Débito mássico*</b>	16.7 kg/h
<b>Temperatura de entrada do fundido</b>	230 °C
<b>Temperatura da paredes exteriores do canal de fluxo</b>	230 °C
<b>Paredes interiores do canal de fluxo</b>	Adiabáticas

\* corresponde a uma velocidade de produção de 100mm/s

No início dos cálculos utilizaram-se malhas com duas células ao longo da espessura. A malha típica utilizada no estágio final dos cálculos, ilustrada na Figura 4, possuía 10 células ao longo da espessura totalizando aproximadamente 160.000 células. O tempo de cálculo correspondente a cada iteração efectuada com as malhas mais refinadas, incluindo a geração da malha e a modelação do fluxo, é de aproximadamente 1.25, horas num computador com processador Pentium III a 933Mhz.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos no decurso da optimização estão ilustrados nas Figuras 5 e 6, em termos da função objectivo.



**Figura 5** – Valores da função objectivo obtidos em iterações sucessivas do processo de optimização baseado na metodologia experimental (EM).

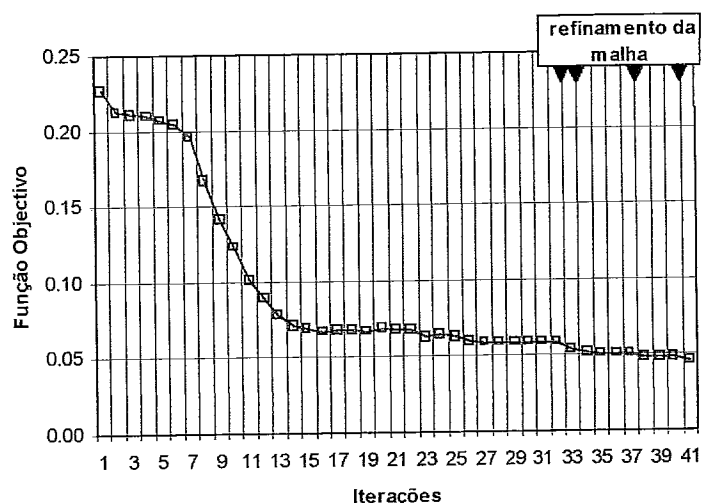


Figura 6 – Valores da função objectivo obtidos em iterações sucessivas do processo de optimização baseado no método SIMPLEX (SM).

Como se pode verificar, as soluções obtidas pelo uso de qualquer das metodologias de optimização são similares em termos do valor final da função objectivo. Porém, como a EM requer menos iterações do que a SM para chegar à solução final (ver Figuras 5 e 6), o tempo total de cálculo dispendido com a EM é cerca de 1/3 do consumido com a SM (ver Tabela 3).

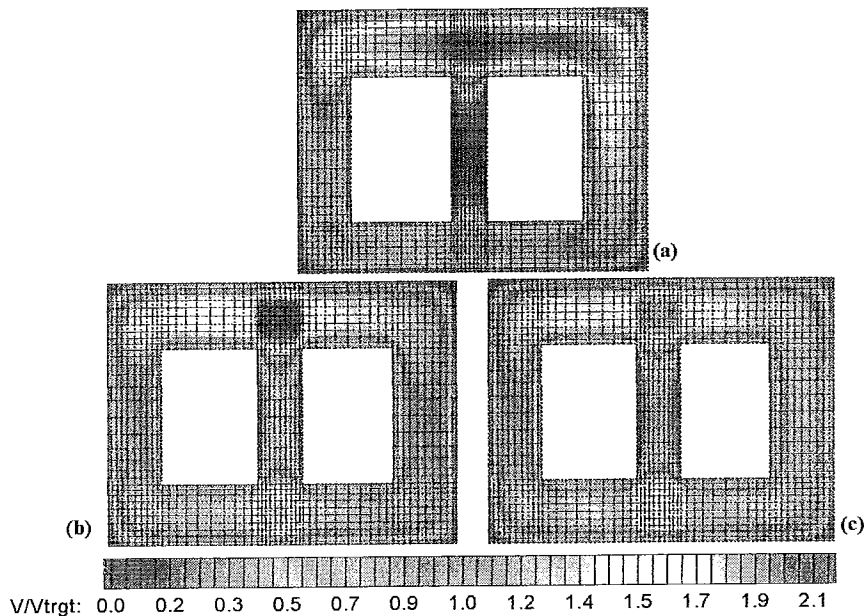
Tal como era esperado, devido ao desequilíbrio geométrico da secção transversal do canal de fluxo, na primeira iteração existem diferenças significativas nas velocidades médias do fundidos e, conseqüentemente, a função objectivo possui um valor elevado. Contudo, no final do cálculo a distribuição de velocidades foi significativamente melhorada.

Tabela 3 –Valores correspondentes ao final de cada um dos estágios de refinamento da malha: diferença máxima de entre todas as variáveis, entre o seu valor final do estágio e o seu valor final do cálculo, e tempo consumido.

		Nº de células ao longo da espessura					
		2	4	6	8	10	
Diferença máxima para a solução final	EM	0%	0%	0%	0%	0%	
	SM	15%	15%	17%	2%	0%	
Tempo de Cálculo [h:m]	EM	0:06	0:10	0:53	2:39	5:03	8:53
	SM	0:32	0:23	3:48	8:37	16:45	24:45

A Tabela 3 ilustra a evolução da maior diferença (de entre todas as variáveis consideradas) entre o valor obtido para cada variável no final de cada estágio de refinamento da malha e o seu valor final. Estes resultados mostram que as malhas com 2 células ao longo da espessura conseguiram prever com elevado grau de precisão a distribuição de fluxo no canal (a metodologia EM chegou à solução final neste estágio). Contudo, é importante referir que os cálculos com as malhas mais refinadas podem ser essenciais caso seja necessário obter valores precisos para os campos de velocidades, pressão e temperatura. Apesar do tempo consumido para terminar os cálculos ser de algumas horas, neste caso específico, o algoritmo chegou à solução final em apenas alguns minutos.

A melhoria obtida para a distribuição de velocidades está ilustrada na Figura 7.



**Figura 7** – Distribuição da razão entre a velocidade média real e a velocidade objectivo, calculada para: (a) geometria tentativa inicial; (b) melhor resultado obtido com a metodologia experimental e (c) melhor resultado obtido com o método SIMPLEX.

## 6. CONCLUSÃO

A metodologia de projecto automático de cabeças e extrusão ilustrada neste trabalho mostrou um elevado potencial, dado que, mesmo para um perfil complexo, permitiu obter uma solução razoável, num curto espaço de tempo, sem nenhuma intervenção externa durante o processo de optimização.

Os dois algoritmos de optimização testados originaram a soluções semelhantes, mas o algoritmo baseado na metodologia experimental mostrou ser mais eficaz que o baseado no método SIMPLEX.

## 7. REFERÊNCIAS

- *Carneiro, O. S., Nóbrega, J. M., Pinho, F. T., Oliveira, P. J.*, J. Mat. Process. Tech., 114, p. 75, 2001;
- *Flow 2000*, Compuplast;
- *Menges, G., Kalwa, M., Schmidt, J.*: Kunstst. 77 (8), p. 797, 1987;
- *Nóbrega, J. M., Carneiro, O. S., Pinho, F. T., Oliveira, P. J.*: Paper presented at the SPE Annual Technical Conference, Dallas, U. S. A., May, 2001;
- *Nóbrega, J. M., Carneiro, O. S., Pinho, F. T., Oliveira, P. J.*, Paper presented at the 17<sup>th</sup> Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Montreal, Canada, June, 2001;
- *Polyflow*, Fluent Inc;
- *Rao, S.S.*, Optimization Theory and Applications, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley Eastern Limited, 1984;
- *Sebastian, D. H., Rakos, R.*: Adv. Polym. Tech. 5, p. 333, 1985;
- *Sienz, J., Bulman, S.D., Pitman, J. F. T.*, Paper presented at 4<sup>th</sup> ESAFORM Conference, Liege, Belgium, 275-278, 2001;
- *Svabik, J., Placek, L., Saha, P.*: Int. Polym. Process. 14 (3), p. 247, 1999;
- *Szarvasy, I., Sienz, J., Pitman, J. F. T., Hinton, E.*: Int. Polym. Process. 15 (1), p. 28, 2000;
- *Vlachopoulos, J., Behncke, P., Vlcek, J.*: Adv. Polym. Tech. 9 (2), p. 147, 1989.