

ESCOAMENTO DE FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS NO INTERIOR DE CANAIS COM CONTRAÇÃO E EXPANSÃO SÚBITAS: UMA ABORDAGEM NUMÉRICA

Paulo Sergio Berving Zdanski, zdanski@joinville.udesc.br¹
Allan Patrick Cordeiro Dias, allanpatrickcd@yahoo.com.br¹
David Roza José, c1b3rz@hotmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Cep.: 89223-100 - Joinville - SC.

Resumo: *O escoamento de fluidos não-Newtonianos ocorre em muitas aplicações de engenharia. Um exemplo prático é um processo de fabricação por injeção, que é caracterizado pelo escoamento de um polímero fundido no interior de canais/cavidades. O conhecimento das características do escoamento (velocidades, pressão, temperatura e viscosidade) é de grande interesse para um melhor controle do processo. Além da aplicação tecnológica, o problema em questão também tem sido o escopo de pesquisas de cunho científico, onde alguns aspectos têm sido discutidos, a saber, efeitos do aquecimento por atrito (dissipação viscosa) e perda de carga. Neste contexto, o presente trabalho analisou numericamente o escoamento de polímeros no interior de canais que apresentem um estrangulamento (uma contração seguida de uma expansão). Este tipo de assimetria ocorre tipicamente na entrada de uma cavidade e caracteriza (como primeira aproximação) um canal de ataque. Devido à elevada temperatura do processo, em uma abordagem teórica, o modelo de fluido Newtoniano generalizado se torna adequado para descrever o fenômeno físico de interesse. Neste modelo, as leis de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são utilizadas em conjunto com uma relação constitutiva que descreve a reologia do polímero. Esta foi a metodologia adotada no presente trabalho, onde as equações de governo resultantes foram discretizadas utilizando o método de diferenças finitas. Os principais objetivos desta investigação científica consistiram em analisar a relação entre alguns parâmetros típicos deste tipo de processo: efeitos de aspectos geométricos (espessura, h , e comprimento, L , do canal de estrangulamento) sobre a perda de carga (variação de pressão no escoamento) e o aquecimento do polímero devido ao atrito. Os principais resultados obtidos demonstraram que a redução da espessura do canal de estrangulamento, h , aumenta drasticamente a perda de carga enquanto tem um efeito praticamente desprezível sobre o aquecimento do polímero.*

Palavras-chave: *Dissipação viscosa; Métodos numéricos; Fluidos não-Newtonianos; Contração-expansão.*

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de técnicas computacionais de simulação numérica vem ganhando, nos dias atuais, cada vez mais espaço no âmbito industrial, devido à necessidade crescente de desenvolvimento tecnológico e melhoria contínua na qualidade dos produtos. Tais técnicas quando bem empregadas permitem uma previsão rápida e precisa dos fenômenos envolvidos, o que na maioria dos casos reduz gastos com experimentação e prototipagem. A proposta abordada neste trabalho é a simulação numérica do escoamento em regime estacionário de um polímero comercial da classe POM em um canal plano que apresenta um estrangulamento (redução brusca de seção), seguido de uma expansão súbita. Esta geometria se justifica devido a sua similaridade com um canal de ataque tipo filme conhecido na indústria como ‘gate’ (ver Figs. (1) e (2)). Entre os principais objetivos de um canal de ataque, conforme preconizados no meio industrial estão: (i) facilitar a separação de peça injetada sem danificá-la (aspecto visual) e, (ii) aquecer o polímero através do elevado atrito, de forma a se obter uma redução de viscosidade e conseqüentemente aumento na fluidez (melhor preenchimento da cavidade).

Na literatura recente, vários trabalhos envolvendo o escoamento de polímeros fundidos têm sido reportados. Dentre as principais análises apresentadas podem-se citar: (i) Estudo dos efeitos da dissipação viscosa no escoamento de polímeros no interior de canais (Zdanski e Vaz Jr., 2006a, 2006b, 2009a, 2009b); Estes autores apresentam várias análises de escoamentos bidimensionais e tridimensionais, onde aspectos importantes sobre a física envolvida são abordados; (ii) Análise dos efeitos do sistema de arrefecimento e da posição do canal de ataque sobre o campo térmico transiente de peças injetadas (Hassan et al., 2009, 2010); Neste estudo recente é apresentada uma análise numérica do processo de injeção de polímeros (processo cíclico), onde são consideradas as fases de injeção e solidificação.

O presente trabalho teve como objetivos específicos: (i) investigar a relação entre o aquecimento do polímero e parâmetros geométricos importantes tais como espessura (h) e comprimento (L) do canal de estrangulamento (ver Fig. (2)); (ii) correlacionar a perda de carga (variação de pressão) no escoamento com os parâmetros citados anteriormente. As simulações foram realizadas com um código computacional desenvolvido pelos próprios autores em linguagem de programação FORTRAN com análise baseada em uma solução acoplada das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. O modelo de fluido Newtoniano generalizado é adotado, onde a viscosidade aparente do polímero é determinada como função da taxa cisalhante e temperatura através da lei de Arrhenius Modificada. Os principais resultados obtidos demonstraram que a redução da espessura do canal de estrangulamento, h , aumenta drasticamente a perda de carga enquanto tem um efeito praticamente desprezível sobre o aquecimento do polímero.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho trata da simulação numérica do escoamento de polímeros em um canal de ataque ('gate'), geometria esta que foi modelada bidimensionalmente como um estrangulamento (redução brusca de seção) seguido de uma expansão súbita. As figuras que seguem ilustram a situação real e o modelo adotado, respectivamente.

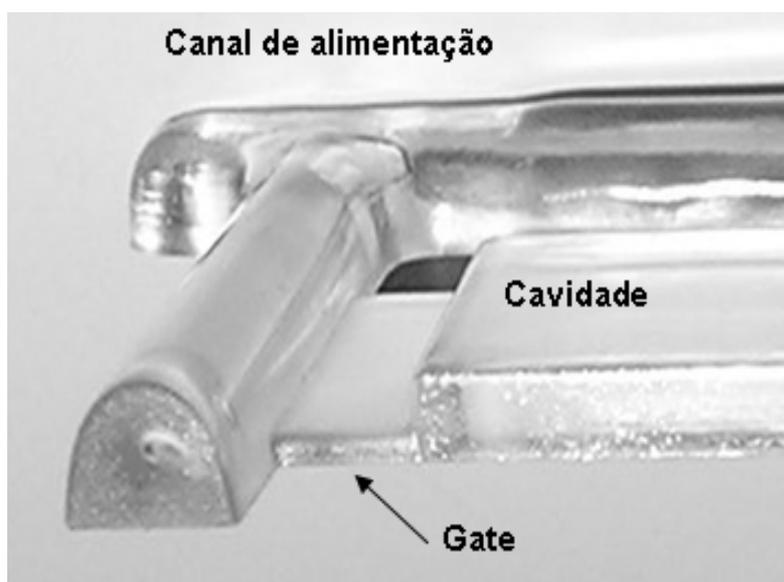


Figura 1. Ilustração de um canal de ataque ('gate').

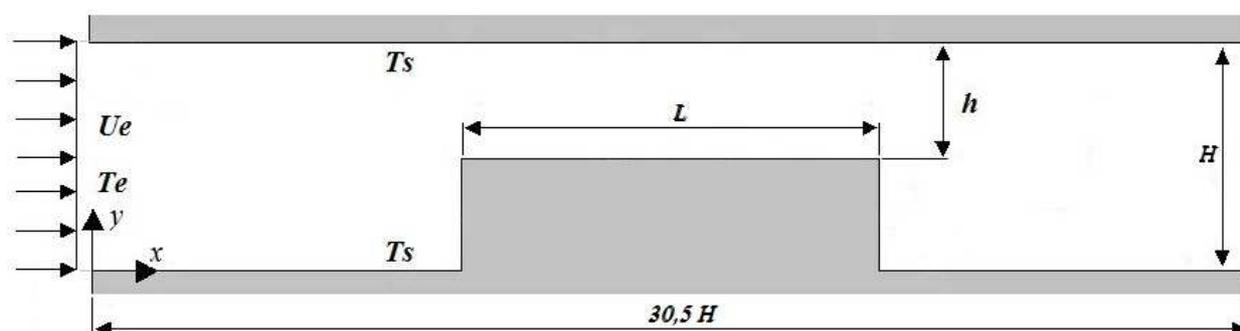


Figura 2. Ilustração de um estrangulamento seguido de uma expansão súbita.

A altura total (H) do canal foi assumida como parâmetro fixo, enquanto que a espessura (h) e comprimento (L) da seção de estrangulamento foram parâmetros variados nas simulações. T_e é a temperatura de entrada (assumida como uniforme) e T_s a temperatura de superfície da parede do canal. A seção de entrada foi considerada como origem do sistema de coordenadas (ver Fig. (2)) e a seção de estrangulamento se encontra em $x/H = 15.0$. A metodologia utilizada para solução do problema proposto consiste no estabelecimento desta geometria modelo para o problema físico real, a adoção de um modelo matemático, a discretização das equações do mesmo em uma malha computacional utilizando o método de diferenças finitas e a solução iterativa de um sistema de equações algébricas acopladas.

Para abordagem teórica do problema utilizaram-se as seguintes hipóteses: (i) o canal de ataque foi modelado por um estrangulamento seguido de uma expansão súbita; (ii) o escoamento foi considerado bidimensional, incompressível e laminar; (iii) a solução final obtida com a abordagem clássica de mecânica dos fluidos reflete o comportamento do escoamento contínuo do polímero (regime estacionário), que se estabelece durante a fase de injeção.

2.1. Equações de Governo

O escoamento de um polímero fundido é aproximado pelo modelo de fluido Newtoniano generalizado, no qual a viscosidade é determinada como função da temperatura e taxa cisalhante. Os campos de velocidade (u, v), temperatura (T) e pressão (p) foram obtidos com a resolução das equações de quantidade de movimento, energia e continuidade que em coordenadas cartesianas e utilizando a notação indicial são dadas respectivamente por

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta(T, \dot{\gamma}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma}^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

onde η é a viscosidade aparente, $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, T a temperatura, K , e $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento equivalente, s^{-1} . Os demais símbolos são padronizados na literatura: p é a pressão, Pa ; ρ a densidade do fluido, kg/m^3 ; k a condutividade térmica, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$; u_i e u_j são os componentes de velocidade, m/s ; c_p o calor específico a pressão constante, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; x_i e x_j são as coordenadas cartesianas, m , e t corresponde ao tempo, s .

Para o problema de interesse, a taxa de cisalhamento equivalente, $\dot{\gamma}$, é dada por

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2}. \quad (4)$$

O termo $\eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma}^2$ (ver Eq.(2)) corresponde à dissipação viscosa e modela a conversão de energia mecânica em calor devido ao atrito no escoamento.

A determinação da viscosidade aparente do polímero (comportamento não-Newtoniano) foi efetuada através da relação constitutiva conhecida como lei de Arrhenius modificada. Esta relação modela o comportamento reológico de um polímero da série POM. Segundo a lei de Arrhenius Modificada (Koh et al., 2004), a viscosidade aparente é determinada por

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1.0 + \frac{\eta_0}{K} \dot{\gamma}^{(1-n_2)}}, \quad (5)$$

$$\eta_0 = c \cdot e^{dT}, \quad (6)$$

onde as constantes são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 1. Constantes materiais (modelo de Arrhenius Modificado).

K	$1.924 \times 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{n_2}$
n_2	0.39092
c	$1.18569 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
d	$-1.6844 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$

Os valores de condutividade térmica, calor específico e massa específica para este polímero são respectivamente $k = 0.125 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, $c_p = 3182 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ e $\rho = 1198.3 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Como se pode observar, não existe uma equação explícita para a resolução do campo de pressão, problema típico de escoamentos incompressíveis (acoplamento pressão-velocidade). Este problema foi resolvido através da solução de uma equação de Poisson para pressão. Esta equação foi adequada para fluidos não-Newtonianos em Vaz Jr. e Zdanski (2007).

Com o objetivo de avaliar a transferência de calor nas paredes do canal durante o escoamento do polímero, nesse trabalho foi avaliado numericamente o número de Nusselt local, que por definição fornece uma medida da transferência

de calor por convecção que ocorre na superfície. Para a obtenção deste parâmetro foi utilizado o conceito de temperatura média de mistura do fluido, em uma dada seção transversal

$$T_m(x) = \frac{\int_0^{h^*} u(y)T(y)dy}{u_m(x)h^*}, \quad (7)$$

onde $u_m(x)$ é a velocidade média na seção e h^* é a altura total na seção. Quando $T_m(x)$ é avaliado a montante ou a jusante do canal de ataque, $h^* = H$ (altura total do canal); por outro lado, quando $T_m(x)$ é avaliado no estrangulamento $h^* = h$ (espessura do canal de ataque). A posição $y = 0$ corresponde às paredes horizontais do canal. De forma similar, a velocidade média na seção é dada pela relação

$$u_m(x) = \frac{\int_0^{h^*} u(y)dy}{\int_0^{h^*} dy}. \quad (8)$$

Desta forma, o número de Nusselt local é definido como

$$Nu(x) = \frac{h_{conv}(x) \cdot H}{k} \quad (9)$$

Na equação (9) $h_{conv}(x)$ é o coeficiente local de convecção e k o coeficiente de condutividade térmica do fluido, que neste caso vale 0.125 W/m.K. Para obter o coeficiente de convecção local, utiliza-se um balanço de energia na superfície do canal

$$q_s'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h_{conv}(x) \cdot [T_s - T_m(x)]. \quad (10)$$

2.2. Condições de Contorno

Para a solução das equações físicas são necessárias condições de contorno para as variáveis do problema. Tais condições estão vinculadas à geometria e condições de entrada do escoamento. Nas paredes sólidas é utilizada a condição de não-escorregamento para as velocidades (velocidade igual a zero) e temperatura constante (no caso $T_s = 453K$), enquanto que para a pressão utiliza-se uma extrapolação de ordem zero (derivada normal à parede nula). Na fronteira de entrada são especificados perfis uniformes de velocidade e temperatura, enquanto que na fronteira de saída utiliza-se a condição de fluxo por difusão igual a zero (condição parabólica). Para a pressão é aplicada uma variação linear na fronteira de entrada e condição parabólica na seção de saída.

2.3. Método Numérico

O esquema numérico utilizado neste trabalho foi inicialmente proposto em Vaz Jr. e Zdanski (2007), o qual já vem produzindo resultados que foram validados e publicados em periódicos qualificados. O método consiste em discretizar, utilizando diferenças finitas, as equações físicas em uma malha computacional co-localizada, sendo utilizadas fórmulas centradas com segunda ordem de precisão espacial para os termos convectivos e difusivos. O avanço no tempo é efetuado utilizando o método de Euler implícito, onde é percorrido um falso transiente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através de simulação numérica, assim como análise do comportamento físico do escoamento. A geometria foi simulada com três espessuras (h) e comprimentos (L) distintos (ver Fig. (2)). Na primeira etapa foi fixado o comprimento $L = 4$ mm e variada espessura do canal de ataque: $h = 4$ mm, 3 mm e 2 mm. Na segunda etapa foi fixada espessura $h = 4$ mm e variado o comprimento do canal de estrangulamento: $L = 4$ mm, 6 mm e 8 mm. Em todas as simulações anteriormente descritas a altura total do canal foi mantida fixa como $H = 8$ mm. Todos os casos foram simulados estipulando $U_e = 4, 6$ e 10 cm/s e diferentes configurações de temperaturas: (i) $T_e = T_s = 453$ K e (ii) $T_e = 473$ K $> T_s = 453$. O caso (i) é uma situação onde qualquer alteração nas temperaturas no interior do escoamento é devido ao efeito da dissipação viscosa (transformação de energia mecânica em calor devido à ação da viscosidade) e o caso (ii) descreve uma situação mais real, onde o polímero entra na cavidade com uma temperatura maior que a da superfície do molde.

As simulações foram efetuadas para uma malha computacional cartesiana não-uniforme, com concentração de pontos nas regiões de quina e junto às paredes. Tanto a validação do esquema numérico quanto estudos de refinamento de malha (independência dos resultados em relação à malha) foram efetuados em trabalhos prévios dos referidos autores (Zdanski e Vaz Jr., 2006b; Vaz Jr. e Zdanski, 2007).

3.1. Topologia do Escoamento e Forma Genérica de Perfis

Apresenta-se na Fig. (3) a topologia do escoamento através de linhas de corrente. Observam-se pequenos vórtices nas regiões de estrangulamento e expansão, sendo os mesmos extremamente confinados nas concavidades, devido à elevada viscosidade do polímero fundido. A topologia do escoamento esta de acordo com os resultados de Bao (2003) para escoamento isotérmico. O caso simulado corresponde a $U_e = 6\text{cm/s}$ e $T_e = 473\text{ K}$ e $T_s = 453\text{ K}$ onde o efeito da dissipação viscosa é considerado. As regiões de recirculação têm uma extensão de aproximadamente $x/H = 0.125$. É importante mencionar que a topologia do escoamento é muito semelhante para outras configurações de temperaturas, geometrias e velocidades simuladas, e a existência de diferentes comprimentos de vórtice não são detectadas, função dos baixos números de Reynolds do problema.

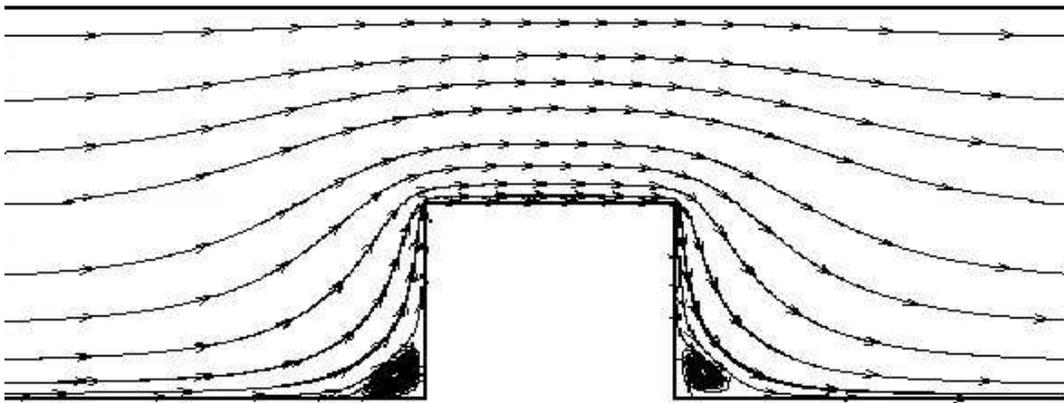


Figura 3. Linhas de corrente.

Tem-se nas Figs. (4) e (5) os perfis de temperatura em função da variação da espessura (h) de estrangulamento para as seções a montante e a jusante do canal de ataque. As condições de simulação foram $U_e = 6\text{ cm/s}$ e $T_e = T_s = 453\text{K}$, sendo esta configuração de temperaturas adotada para fins de estudo do efeito da dissipação viscosa.

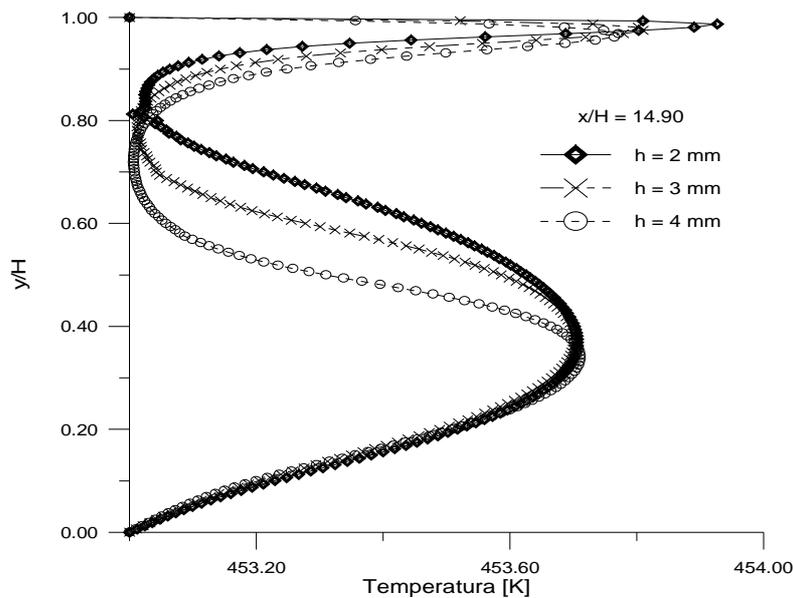


Figura 4. Perfis de temperatura numa seção a montante da contração ($U_e = 6\text{ cm/s}$ e $T_e = T_s = 453\text{K}$).

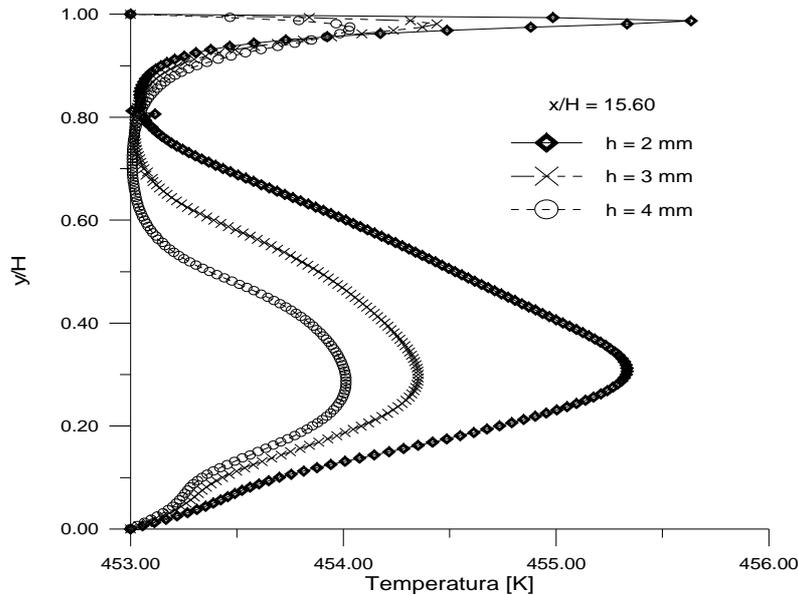


Figura 5. Perfis de temperatura numa seção a jusante da contração ($U_e = 6 \text{ cm/s}$ e $T_e = T_s = 453\text{K}$).

Na Figura (4) (perfis a montante do estrangulamento) se pode observar que até aproximadamente a altura $y/H = 0.4$ os valores de temperatura permanecem praticamente iguais (independentes de h). Este fato ocorre devido ao efeito do vórtice aprisionado no canto do degrau, que inibe a transferência de calor nesta região. Fazendo uma análise de aquecimento em termos de redução de h tem-se: (i) para redução de $h = 4 \text{ mm}$ para 3 mm um incremento máximo de temperatura de aproximadamente 0.30K em $y/H = 0.54$ e para redução de $h = 3 \text{ mm}$ para 2 mm um incremento máximo de temperatura de aproximadamente 0.20K em $y/H = 0.64$.

Através da análise da Fig. (5) (perfis a jusante da expansão) tem-se: (i) uma redução de $h = 4 \text{ mm}$ para 3 mm provoca um incremento máximo de temperatura de aproximadamente 0.50K em duas regiões, $y/H = 0.50$ e próximo a parede superior e (ii) uma redução de $h = 3 \text{ mm}$ para 2 mm causa um incremento máximo de temperatura de aproximadamente 1.00K em $y/H = 0.30$ e próximo a parede superior. Esses acréscimos de temperatura são consequência direta do aumento da taxa cisalhante junto às quinas e parede superior em função da redução da espessura do canal de estrangulamento (h).

Esses resultados são de grande aplicabilidade tecnológica, pois no meio industrial se acredita (empiricamente) que ao se realizar uma contração no canal de ataque (redução de espessura h) ocorre um aquecimento da massa polimérica nesta região devido ao atrito promovendo uma redução de viscosidade e melhor preenchimento da cavidade. Entretanto, para os casos analisados no presente trabalho, o aquecimento provocado pela redução de espessura do canal é praticamente desprezível.

3.2. Análise de Parâmetros do Escoamento

Na Fig. (6) são representadas as diferenças entre a pressão média obtida em uma seção qualquer x/H e a pressão média na entrada do canal para diferentes espessuras (h). Para este estudo foi assumido $L = 4 \text{ mm}$, $U_e = 6 \text{ cm/s}$ e $T_e = T_s = 453\text{K}$. Inicialmente, observa-se uma queda brusca de pressão na região do estrangulamento ($x/H = 15$), sendo que a montante e a jusante desta seção a variação de pressão é praticamente linear (similar a distribuição em um canal plano).

Analisando o efeito da redução de espessura do canal (h), verifica-se que a variação de pressão é drasticamente afetada na região do estrangulamento e, também, a jusante do mesmo. Conforme resultados apresentados na Fig. (6), a queda global de pressão (diferença entre a pressão média na saída e na entrada do canal) variou entre 0.98 MPa ($h = 4 \text{ mm}$), 1.20 MPa ($h = 3 \text{ mm}$) e 1.91 MPa ($h = 2 \text{ mm}$). Tem-se um aumento de aproximadamente 94% na variação de pressão quando se reduz de um canal com $h = 4 \text{ mm}$ para $h = 2 \text{ mm}$. Desta forma, a redução de espessura h implica num aumento substancial da perda de carga no escoamento.

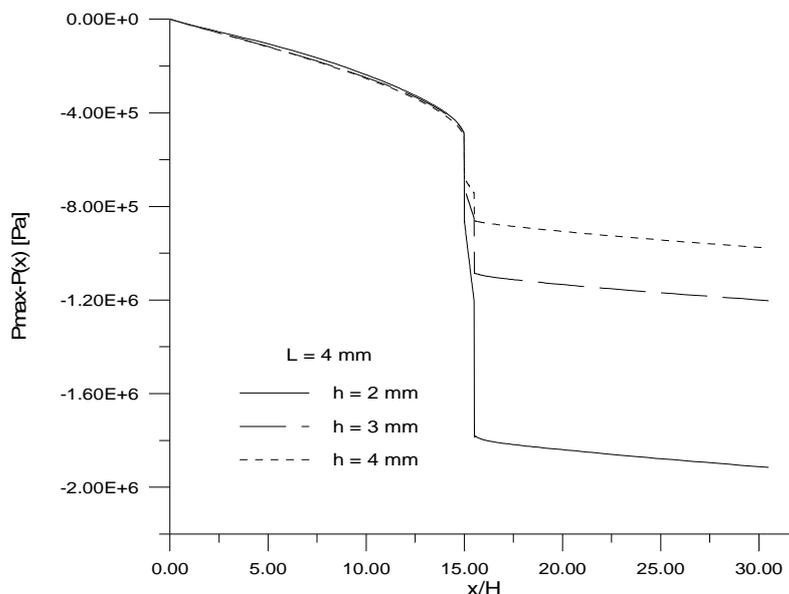


Figura 6. Distribuição de pressão média ao longo do comprimento do canal.

Na Fig. (7) é apresentada a variação de pressão média ao longo do canal, onde foi fixada a espessura $h = 4$ mm e variado o comprimento L . Observa-se que a queda global de pressão no canal é mais sensível à variação da espessura h do que ao comprimento L . Para este caso a queda global de pressão variou entre 0.98 MPa ($L = 4$ mm), 1.00 MPa ($L = 6$ mm) e 1.07 MPa ($L = 8$ mm).

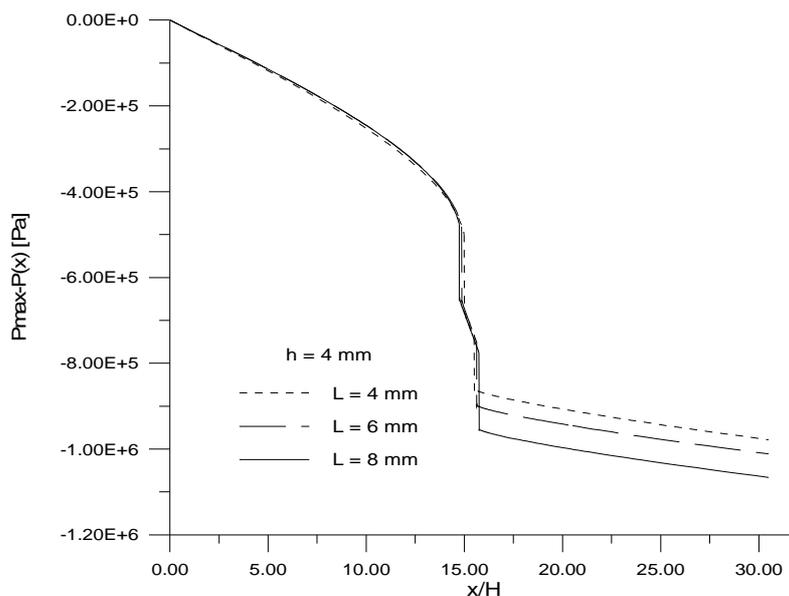


Figura 7. Distribuição de pressão média ao longo do comprimento do canal.

As Figs. (8), (9) e (10) mostram a variação do número de Nusselt ao longo das paredes inferiores do canal a montante, na região e a jusante da seção de estrangulamento, respectivamente. Estes resultados foram simulados para $T_e > T_s$, aqui representados para $U_e = 4$ cm/s, e para diferentes espessuras h do canal de ataque.

Analisando a Fig. (8) pode-se observar um elevado número de Nusselt na entrada do canal, seguido de um decréscimo acentuado. Este comportamento é similar ao escoamento em um canal plano (Zdanski e Vaz Jr., 2006a). Na seção próxima a $x/H = 15.0$ (a montante do estrangulamento) o número de Nusselt tende a zero, consequência da região de recirculação (ver Fig. (3)) que reduz abruptamente a troca de calor. Observa-se também que a variação de espessura h praticamente não afeta o número de Nusselt a montante do estrangulamento.

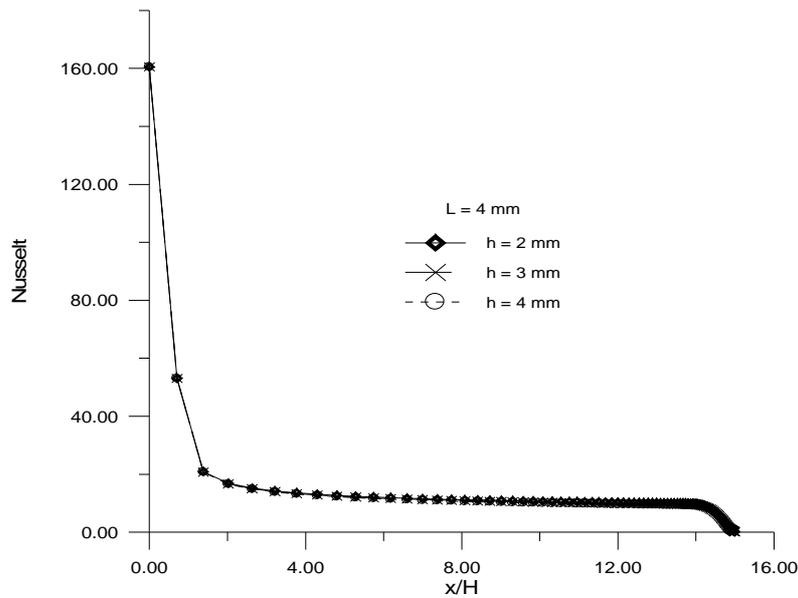


Figura 8. Número de Nusselt na região a montante ($0 \leq x/H < 15.0$).

Na Figura (9) tem-se a variação do número de Nusselt na seção de estrangulamento, onde se observa que nas regiões das quinas ($x/H = 15.0$ e 15.5) da geometria se tem um acréscimo acentuado do número de Nusselt devido à consequência direta do elevado atrito. Pode-se observar ainda que a redução de espessura h implica em um acréscimo do número de Nusselt. Esse efeito é explicado pelo aumento da velocidade local do escoamento devido ao maior estrangulamento, que por sua vez aumenta drasticamente o gradiente de temperaturas na parede. Com a redução de espessura do canal de estrangulamento de $h = 4$ mm para 3 mm se tem um acréscimo do número de Nusselt de aproximadamente 47% para $x/H = 15.23$; Por outro lado, uma redução de $h = 3$ mm para 2 mm para a mesma seção provoca um acréscimo de aproximadamente 65% no número de Nusselt.

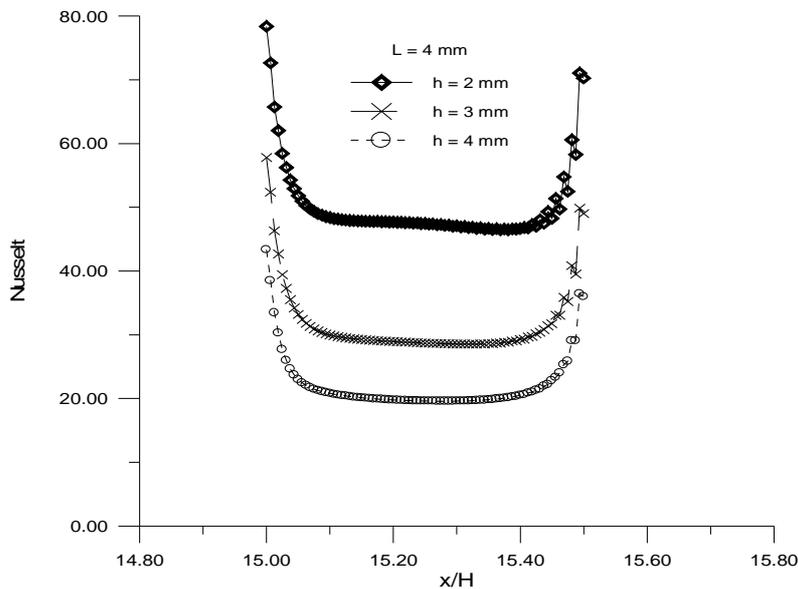


Figura 9. Número de Nusselt na região de estrangulamento ($15.0 \leq x/H \leq 15.5$).

Para a região a jusante da expansão súbita (Fig. (10)), pode-se observar para $x/H = 15.5$ o mesmo efeito de recirculação descrito para a região a montante da contração, onde o número de Nusselt apresenta uma redução abrupta. As curvas apresentam um ponto de máximo (aproximadamente em $x/H = 16.6$), que corresponde a uma posição próxima ao ponto de recolamento do escoamento. Quanto ao efeito da redução de espessura h , tem-se um acréscimo máximo de aproximadamente 7% do número de Nusselt para redução de $h = 4$ mm para 3 mm e de aproximadamente 18% para redução de $h = 3$ mm para 2 mm.

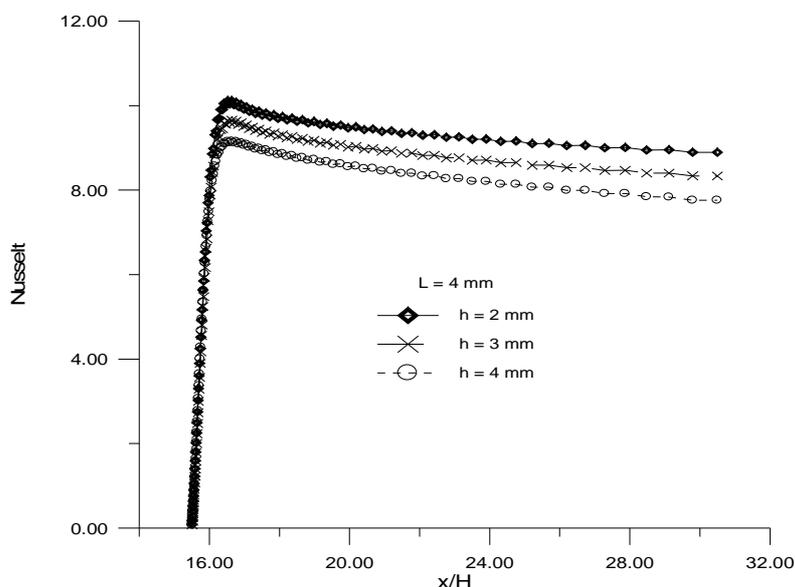


Figura 10. Número de Nusselt na região a jusante da expansão súbita ($15.5 < x/H \leq 30.5$).

4. CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi analisar numericamente o escoamento de um polímero da série POM em um canal com um estrangulamento (uma contração seguida de uma expansão), visando uma melhor compreensão dos aspectos físicos envolvidos neste tipo de geometria. Foram realizadas diversas simulações com diferentes combinações de geometrias de canal de ataque (gate) para uma investigação da relação entre os parâmetros geométricos e o aquecimento do polímero e a queda global de pressão. As principais conclusões obtidas a partir da análise dos resultados foram: (i) Foi verificado que para as geometrias e parâmetros de escoamento utilizados no presente trabalho, o aquecimento provocado pela redução de espessura do canal h , apesar da alta taxa de deformação cisalhante que ocorre junto à seção de contração, é muito pequeno; para uma redução de $h = 3$ mm para 2 mm foi observado um incremento máximo de temperatura de aproximadamente 1.00K próximo às paredes (quinas e parede superior do estrangulamento). (ii) A variação de pressão é drasticamente afetada pela redução do parâmetro h , onde foi observado um aumento de aproximadamente 94% na queda de pressão no canal se diminuída a espessura $h = 4$ mm para 2 mm. Em termos práticos, a redução de espessura h implicaria em um aumento da pressão de injeção necessária para promover o escoamento; (iii) Em relação à transferência de calor por convecção, foi observado um acréscimo significativo do número de Nusselt com a redução de espessura h de canal de ataque. Esse acréscimo chega a aproximadamente 65% para redução de $h = 3$ mm para 2 mm na região de estrangulamento e aproximadamente 18% para a mesma razão de contração na região a jusante da expansão súbita.

5. REFERÊNCIAS

- Bao, W., 2003, "An Economical Finite Element Approximation of Generalized Newtonian Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, pp. 3637-3648.
- Hassan, H., Regnier, N., Defaye, G., 2009, "A 3D Study on the Effect of Gate Location on the Cooling of Polymer by Injection Molding", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 1218-1229.
- Hassan, H., Regnier, N., Le Bot, C., Defaye, G., 2010, "3D Study of Cooling System Effect on the Heat Transfer during Polymer Injection Molding", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 161-169.
- Koh, Y.H., Ong, N.S., Chen, X.Y., Lan, Y.C., Chai, J.C., 2004, "Effect of Temperature and Inlet Velocity on the Flow of a non-Newtonian Fluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.31, pp. 1005-1013.
- Vaz Jr., M.; e Zdanski, P.S.B., 2007, "A fully implicit finite difference scheme for velocity and temperature coupled solution of polymer melt flow", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 49, pp. 161-169.
- Zdanski, P.S.B., Vaz JR., M., 2006b, "Polymer melt flow in plane channels: hydrodynamic and thermal boundary layers", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 179, pp. 207-211.
- Zdanski, P.S.B., Vaz JR., M., 2006a, "Polymer melt flow in plane channels: effects of the viscous dissipation and axial heat conduction", *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, Vol. 49, pp. 159-174.
- Zdanski, P.S.B., Vaz Jr., M., 2009a, "Non-Isothermal Polymer Melt Flow in Sudden Expansions", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 161, pp. 42-47.
- Zdanski, P.S.B., Vaz Jr., M., 2009b, "Three-dimensional polymer melt flow in sudden expansions: Non-isothermal flow topology", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 3585-3594.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Paulo Sergio Berving Zdanski, Allan Patrick Cordeiro Dias e David Roza José são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

NON-NEWTONIAN FLOWS INSIDE CHANNELS WITH CONTRACTION- EXPANSION SECTIONS: A NUMERICAL ANALYSIS

Paulo Sergio Berving Zdanski, zdanski@joinville.udesc.br¹
Allan Patrick Cordeiro Dias, allanpatrickcd@yahoo.com.br¹
David Roza José, c1b3rz@hotmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Cep.: 89223-100 - Joinville - SC.

Abstract. *Non-Newtonian flows occur in many practical engineering problems. An important example corresponds to an injection problem, where a molten polymer flows inside channels/cavities. The knowledge of the flow behavior (velocities, pressure, temperature and viscosity fields) is highly desirable aiming at controlling the process (technologic field). Besides, the problem is being discussed in recent literature works where some important aspects are studied, i.e., viscous heating effects e head loss. In this context, the present work aims at studying numerically the polymer melt flow inside channels with sudden contraction/expansion sections. This type of asymmetry occurs typically at the entrance of a mould cavity and models the gate. Due to the high temperature of the process, in a theoretical framework, the Generalized Newtonian model becomes suitable for flow description. Therefore, the conservation principles of mass, linear momentum and energy are employed together with a constitutive relation describing the polymer Rheology. The resulting equations are discretized adopting the finite difference technique. The main objectives of this work are: (i) analysis of the effect of geometric parameters (thickness h and length L of the contraction section) on head loss, and (ii) temperature rise of the polymer due to viscous heating effect. The main results indicate that the reduction of the thickness h , highly enhance the pressure loss in the channel. Otherwise, the effect on heating the polymer flow is almost negligible.*

Keywords: *numerical analysis, polymer melt flow, convergence analysis, finite differences.*